



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

ANÁLISIS DE LA POTENCIA DISIPADA Y TEMPERATURA
QUE ALCANZA UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA
SOMBREADA

Alumno: Izaskun Iraizoz Latasa

Tutor: Miguel García Solano

Pamplona, 26 de Julio de 2011

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi tutor Miguel García Solano y a Luis Marroyo por sacar este proyecto a delante y a Idoia San Martín y Resu Iturri por todo vuestro apoyo y ayuda recibida.

También quiero agradecer a mi familia, a mis amigas y a Juan Manuel por estar ahí durante todo el proceso. Sin vosotros este proyecto hubiese sido más duro.

Muchísimas gracias a todos

ÍNDICE

1.-Capítulo 1: Antecedentes y objetivos	7
1.1 ANTECEDENTES. PROBLEMA DEL PUNTO CALIENTE	7
1.2 OBJETIVOS DEL PFC	9
1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO Y FASES DEL PROYECTO	10
1.4 RESULTADOS DE APRENDIZAJE	11
1.5 IMPORTANCIA DEL PROYECTO	11
2.-Capítulo 2: Fundamentos teóricos	13
2.1 INTRODUCCIÓN	13
2.2 LA CÉLULA FOTOVOLTAICA	13
2.3 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CÉLULAS SOLARES	14
2.4 PARÁMETROS QUE DEFINEN EL FUNCIONAMIENTO DE UNA CÉLULA SOLAR	15
2.5 CIRCUITO EQUIVALENTE	16
2.6 EL MÓDULO FOTOVOLTAICO	18
2.7 PARÁMETROS QUE DEFINEN EL FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO	19
2.8 DIODOS DE PASO	20
3.-Capítulo 3: Análisis teórico	23
3.1 INTRODUCCIÓN	23
3.2 SELECCIÓN DE CÉLULAS	24
3.3 CÁLCULO DE LA POTENCIA DISIPADA EN LA CÉLULA SOMBREADA	25
3.4 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA QUE ALCANZA LA CÉLULA SOMBREADA	28
4.-Capítulo 4: Análisis experimental	33
4.1 EQUIPOS UTILIZADOS EN EL MONTAJE	33
4.2 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE	35
4.3 PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE MEDIDAS	35
5.-Capítulo 5: Resultados	37
5.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ANÁLISIS TEÓRICO Y EXPERIMENTAL. VALIDACIÓN DEL MODELO	37
5.2 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DEPENDIENDO DE VARIOS FACTORES	39

5.3 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA POTENCIA DISIPADA DEPENDIENDO DE VARIOS FACTORES.....	41
6.-Capítulo 6: Conclusiones y líneas futuras	43
6.1 CONCLUSIONES	43
6.2 LÍNEAS FUTURAS.....	44
Bibliografía	45
Anexo: Tablas de resultados	47

Capítulo 1

Antecedentes y objetivos

1.1 ANTECEDENTES. PROBLEMA DEL PUNTO CALIENTE

En condiciones normales de operación, una célula fotovoltaica genera una tensión a partir de la radiación absorbida del sol, que junto a la tensión generada por el resto de células conectadas en serie producen la tensión de salida del módulo fotovoltaico.

En ocasiones, la célula se polariza de forma inversa, pasando a comportarse como una carga en vez de como un generador. Esta situación puede producirse por un sombreado, por un defecto en las soldaduras o simplemente por no coincidir eléctricamente con el resto de células. En este caso, la célula deja de producir energía y pasa a consumir la energía producida por el resto de células del módulo. Debido a ello pueden aparecer zonas en las que la temperatura es notablemente superior a la de los puntos que la rodean. Estos sobrecalentamientos localizados reciben el nombre de “puntos calientes” y pueden dar lugar a un deterioro de las soldaduras de los contactos y a una degradación progresiva del encapsulante.

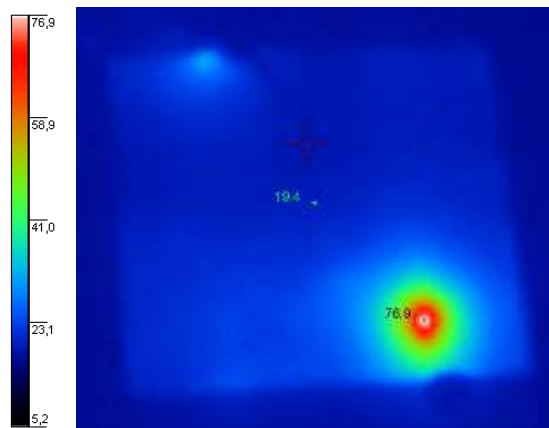


Figura 1: Imagen termográfica de una célula que muestra un punto caliente

Son muchos los factores que determinan la aparición de puntos calientes en un módulo, pero este proyecto se centrará en los sombreados de las células.

Un sombreado parcial sobre un módulo, en el que quede sombreada una célula del módulo, hace variar la curva característica I-V de esa célula respecto a las demás, ya que la radiación incidente sobre ella es distinta. Esta célula sombreada puede, no sólo no producir corriente eléctrica, sino que puede consumirla, es decir, este sombreado ocasiona dos consecuencias inmediatas:

- Una disminución de la potencia máxima de la célula, con la disminución de la producción que esto conlleva.

- Producir una circulación de corriente en sentido inverso en la célula, convirtiéndose, la célula sombreada, en un elemento consumidor de energía en lugar de generador. Esta circulación inversa produce un sobrecalentamiento de la célula que puede llegar a ser elevado, produciendo un deterioro de la célula y, por tanto, del módulo. Además, si la potencia no se disipa de forma uniforme en la célula pueden aparecer pequeñas zonas con temperaturas todavía más elevadas. Esto es lo que se conoce como efecto punto caliente.

En caso de que estos sombreados no sean sombreados temporales en horas de baja irradiancia solar, es recomendable realizar un análisis de sombras sobre la instalación fotovoltaica, tanto las debidas a la situación del campo fotovoltaico como las producidas por edificios colindantes. El uso cada vez más extendido de sistemas de seguimiento solar ha hecho que puedan aparecer sombreados con niveles de irradiancia elevados, lo cual ha incrementado los problemas térmicos en los módulos fotovoltaicos.

Para poder analizar correctamente el sobrecalentamiento y la posible aparición de puntos calientes en las células, bajo distintas condiciones de trabajo del módulo, es necesario conocer el comportamiento de las mismas en condiciones de polarización inversa ya que la temperatura máxima que se alcance va a depender de la forma de la curva I-V en esa zona de trabajo.

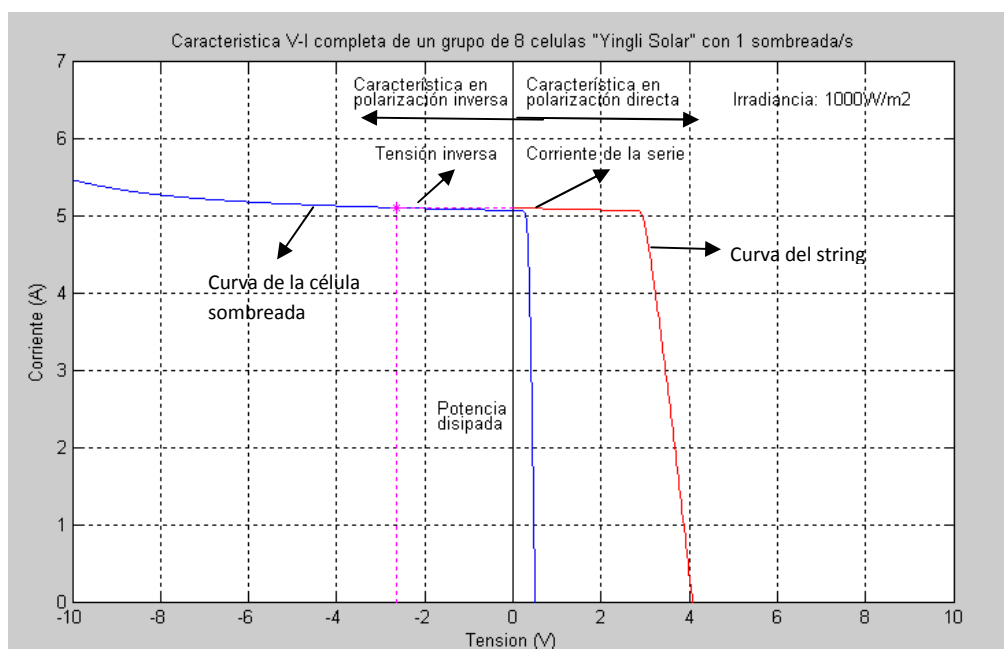


Figura 2: Curva característica I-V de un grupo de células con una sombreada.

Cuando varias células se encuentran conectadas en serie todas ellas se ven forzadas a operar al mismo nivel de corriente. Si una de ellas se encuentra parcialmente sombreada se polarizará de forma inversa y empezará a disipar potencia eléctrica en forma de calor, con lo que se elevará su temperatura. En la figura 2 se representa la curva característica I-V en todo el rango de tensión de una célula solar y del resto de células de un mismo string. Si la corriente

de cortocircuito de las células del string supera la corriente de cortocircuito de la célula parcialmente sombreada, ésta se polariza inversamente y comienza a disipar potencia.

Como se ha comentado anteriormente, la célula sometida a sombreado aumenta su temperatura. El valor que alcance esta temperatura dependerá de varios factores:

- *Nivel de sombreado:* El nivel de sombreado o factor de sombreado afecta tanto a la cantidad de radiación que llega a la célula como a la cantidad de potencia que la célula sombreada va a disipar y por tanto al aumento de temperatura.
- *Número de células por diodo de paso:* El número de células por diodo de paso determina el número de células que están entregando potencia a la célula sombreada y por lo tanto afecta a la cantidad de potencia que se va a disipar.
- *Forma en la que se distribuya la corriente eléctrica en el interior de la célula:* En el PFC [ITU 11], se vio que existe una cierta relación entre la forma de distribución de la corriente eléctrica en el interior de la célula y la forma de la curva I-V en inversa, que como se ha comentado afecta al aumento de temperatura.

El sobrecalentamiento y, sobre todo, la aparición de puntos calientes en un módulo fotovoltaico es un gran problema ya que afecta tanto a la producción como a la vida útil del mismo, produciendo un envejecimiento prematuro. Resulta necesario, por tanto, llevar a cabo estudios que permitan determinar y entender mejor las diferentes causas de aparición de puntos calientes (parece claro que no existe una única causa) y también desarrollar procedimientos y ensayos que sirvan para detectar de forma prematura la posible aparición de este tipo de problema. Por tanto, el presente proyecto estará destinado al análisis de la influencia de los factores anteriormente citados sobre la temperatura que alcanzará una célula sombreada y que hacen que aparezcan los puntos calientes.

1.2 OBJETIVOS DEL PFC

El objetivo fundamental del proyecto es obtener información sobre el comportamiento térmico de las células de un módulo antes de la aparición del punto caliente.

Para poder analizar correctamente la posible aparición de puntos calientes en las células es necesario conocer el comportamiento de las mismas en condiciones de polarización inversa ya que la temperatura máxima que se alcance va a depender de la forma de la curva I-V en esa zona de trabajo. Por ello, se va a analizar el comportamiento en polarización inversa de un grupo de células seleccionadas de un mismo módulo.

Concretamente, se estudiará la potencia disipada y el incremento de temperatura de una célula dependiendo del factor de sombreado y del número de células por diodo bypass. Para ello, se ensayará un módulo Yingli Solar al aire libre. Se realizarán diferentes medidas, sombreado diferentes células y realizando diferentes sombreados parciales. También se

variará el número de células por diodo para poder analizar el efecto que puede tener sobre la potencia disipada por la célula sombreada y su incremento de temperatura.

Se pretende obtener un modelo teórico que permita estimar la temperatura en una célula sombreada para poder analizar los diferentes casos. Para validar ese modelo se utilizarán los ensayos prácticos realizados al aire libre. Este modelo, una vez validado, servirá para poder analizar otros casos sin necesidad de recurrir a ensayos prácticos específicos, con lo que se podrá obtener información sobre los peores casos de sombreado de células, una de las causas de la aparición de puntos calientes, y sobre el óptimo número de células por diodo que se debe seleccionar para evitar los problemas que la presencia de sombras puede ocasionar. Decir también que en la literatura disponible no se encuentran modelos de este tipo para células sombreadas.

Normalmente, las mediciones requieren condiciones de irradiancia estables, por lo que únicamente se podrán realizar durante días en los que las condiciones ambientales sean favorables.

1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO Y FASES DEL PROYECTO

El proyecto se puede dividir en varias fases o etapas, que quedan definidas de la siguiente forma:

FASE I: Adquirir conocimientos básicos sobre FV.

FASE II: Adquirir los conocimientos necesarios sobre el problema de los puntos calientes. Para ello se facilitará al proyectando la documentación necesaria: textos explicativos, artículos de investigación, etc.

FASE III: Aprender a medir de forma correcta generadores y módulos FV mediante el uso de cargas capacitivas y aprender a utilizar una cámara termográfica.

FASE IV: Análisis teórico de la potencia disipada en una célula solar y del incremento de temperatura que experimenta según el número de células por diodo y el nivel de sombreado.

FASE V: Comprobar de forma práctica todo lo visto durante la FASE IV. Para ello se ensayará un módulo Yingli Solar en la azotea del edificio del centro de I+D en electrónica y telecomunicaciones Jerónimo de Ayanz. Para esta tarea se requiere tener buenas condiciones de medida (días despejados).

FASE VI: Estudiar posibles formas de detectar la presencia de módulos defectuosos.

1.4 RESULTADOS DE APRENDIZAJE

El desarrollo del proyecto va a permitir adquirir conocimientos técnicos sobre los siguientes temas:

- Energía solar fotovoltaica: características I-V de módulos fotovoltaicos, comportamiento en diferentes condiciones de irradiancia y temperatura, estado del arte de la tecnología del silicio policristalino.
- Origen y efecto de los puntos calientes en módulos fotovoltaicos.

1.5 IMPORTANCIA DEL PROYECTO

El estudio pretende dar respuesta a uno de los problemas que ha cobrado especial importancia en las centrales fotovoltaicas. En ese sentido, el presente proyecto constituye un importante aporte al estado del arte del comportamiento de módulos fotovoltaicos y podrá ser tenido en cuenta a la hora de prevenir la aparición de puntos calientes.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1 INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica es un tipo de energía renovable obtenida directamente de los rayos del sol. Este tipo de energía, permite transformar una parte de la radiación solar en energía eléctrica, de forma limpia y silenciosa, utilizando para ello las llamadas células fotovoltaicas.

El principio de funcionamiento de las instalaciones fotovoltaicas está basado en el efecto fotovoltaico, mediante el cual se transforma la energía radiante del Sol en energía eléctrica. Este proceso de transformación se produce en un elemento semiconductor que se denomina célula fotovoltaica. Cuando la luz del Sol incide sobre una célula fotovoltaica, los fotones de la luz solar transmiten su energía a los electrones del semiconductor para que así puedan circular dentro del sólido. La tecnología fotovoltaica consigue que parte de estos electrones salgan al exterior del material semiconductor generándose así una corriente eléctrica capaz de circular por un circuito externo.

2.2 LA CÉLULA FOTOVOLTAICA

Una célula fotoeléctrica, también llamada celda fotovoltaica, es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía luminosa en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico.

Las células fotoeléctricas están compuestas de un material, generalmente silicio puro con adición de impurezas de ciertos elementos químicos (boro y fósforo), que presenta efecto fotoeléctrico: absorben fotones de luz y emiten electrones. Cuando estos electrones libres son capturados, el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad.

La eficiencia de conversión media obtenida por las células disponibles comercialmente está alrededor del 11-12%, pero según la tecnología utilizada varía desde el 6% de las células de silicio amorfo hasta el 14-19% de las células de silicio monocristalino.

Las células que se analizan en el presente proyecto son de silicio policristalino. Realmente el silicio es el material más utilizado en los módulos comerciales.

En la siguiente figura tenemos un ejemplo de una célula de silicio monocristalino (izquierda) y otra de silicio policristalino (derecha).



Figura 3: (a) Célula de silicio monocristalino. (b) Célula de silicio policristalino

2.3 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CÉLULAS SOLARES.

Las células solares están constituidas por materiales semiconductores, principalmente silicio, y son elementos que transforman directamente parte de la energía solar que reciben en energía eléctrica.

En los semiconductores de las células solares, para crear la existencia de movimiento de electrones en una única dirección, se crea un campo eléctrico permanente entre ambas caras de la célula, a través de uniones pn. Es la unión de dos regiones del silicio tratadas químicamente de forma diferente.

Las células fotovoltaicas están compuestas por dos capas de semiconductor (silicio) una tipo p y otra tipo n dopadas de forma diferente. La capa superior (tipo n) se encuentra dopada negativamente por un átomo con un electrón más de valencia que el silicio (Fósforo). Por el contrario, la capa p está dopada positivamente al introducir átomos con un electrón menos de valencia (Boro) en la estructura cristalina del silicio.

Al unir ambas capas se crea una unión p-n cuyo funcionamiento es similar a un diodo. Debido a la ley de difusión, los electrones de la capa n (donde hay alta concentración) tiende a dirigirse a la zona p. Esta difusión hace que el semiconductor tipo n se quede cargado positivamente y el tipo p negativamente, crean un campo eléctrico desde la zona n hacia la p.

El campo eléctrico generado en la zona intermedia sirve de separación para las cargas liberadas (electrones y huecos) por la radiación solar. Para extraer la corriente generada en la célula se colocan electrodos metálicos en la cara anterior y posterior de la célula. La capa posterior se cubre completamente con el contacto pero la anterior debe ser lo más transparente posible para dejar pasar la radiación por lo que se suelen serigrafiar los electrodos. Para evitar la reflexión de la radiación se imprime sobre la cara delantera una capa antirreflectante (nitrato de silicio o dióxido de titanio). La figura 4 ilustra la composición y el funcionamiento de una célula solar de silicio cristalino.

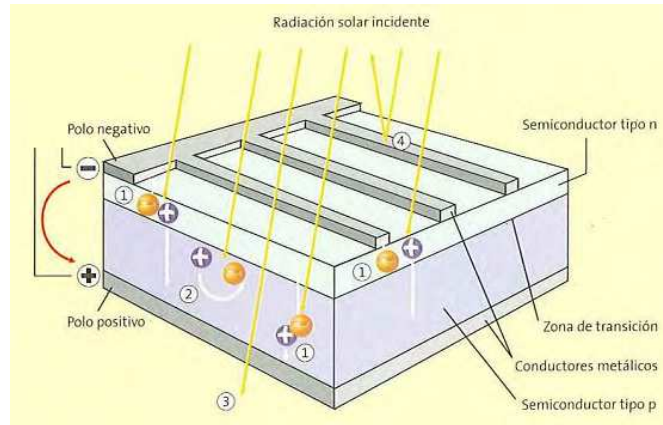


Figura 4: Región pn de una célula solar

2.4 PARÁMETROS QUE DEFINEN EL FUNCIONAMIENTO DE UNA CÉLULA SOLAR

Para el presente proyecto, también será imprescindible el conocimiento del comportamiento eléctrico del módulo. La célula fotovoltaica ideal se define eléctricamente con la siguiente fórmula:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \frac{V}{m \cdot V_T} - 1 \right]$$

Donde:

- I_L es la corriente generada por la radiación incidente
- I_0 es la corriente inversa de saturación del diodo
- V_T es el potencial térmico ($V_T = kT/e$, siendo k la constante de Boltzmann, T la temperatura en Kelvin y e la carga del electrón)
- m el factor de idealidad del diodo. Toma valores entre 1 y 2.

La curva tiene el siguiente aspecto:

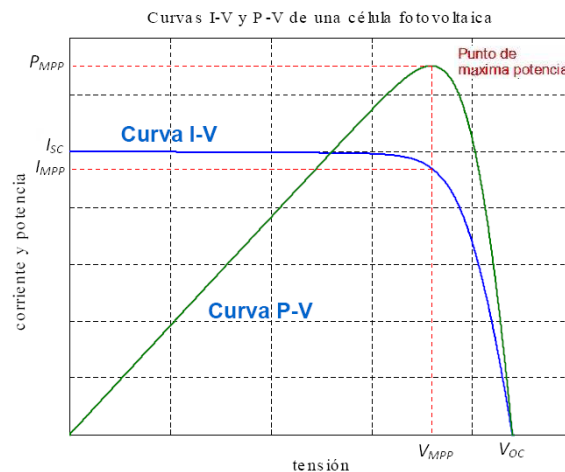


Figura 5: Curva característica I-V

Los valores representativos de esta curva son:

- *Corriente de cortocircuito, I_{sc}* : es la máxima corriente que puede entregar una célula a tensión nula, en determinadas condiciones de radiación y temperatura. Aumenta con la radiación incidente.

$$I_{sc} = I_L$$

- *Tensión de circuito abierto, V_{oc}* : es la máxima tensión que puede entregar una célula a corriente nula, en determinadas condiciones de radiación y temperatura. En células de silicio de tipo medio se sitúa en torno a 0,6 V, mientras que en las de GaAs en torno a 1V.
- *Corriente a máxima potencia, I_{MPP}* : corriente que entrega la célula a potencia máxima bajo unas determinadas condiciones de radiación y temperatura.
- *Tensión a máxima potencia, V_{MPP}* : tensión que entrega la célula a potencia máxima bajo unas determinadas condiciones de radiación y temperatura.
- *Potencia máxima, P_{MPP}* : para cada punto de la curva I-V, el producto de la corriente y la tensión representa la potencia de salida de la célula para cada condición de operación. El punto de máxima potencia (MPP), se alcanza en un punto donde el producto I-V es máximo (I_{MPP}, V_{MPP}).

$$P_{MPP} = I_{MPP} \cdot V_{MPP}$$

- *Eficiencia, η* : Relación entre la potencia máxima obtenida y la potencia luminosa incidente.

$$\eta = \frac{V_{MPP} I_{MPP}}{P_L}$$

2.5 CIRCUITO EQUIVALENTE

El circuito equivalente de una célula solar ideal es una fuente de corriente en paralelo con un diodo. En una célula solar real hay que tener en cuenta, por una parte, la resistencia de la zona neutra del semiconductor, por lo que hay que añadir una resistencia en serie R_s al circuito equivalente y, por otra parte, las posibles pérdidas en la barrera del diodo, que dan lugar a un efecto similar al que tendría una resistencia R_p en paralelo con el diodo. El circuito equivalente sería el que muestra la figura 6 y su característica I (V) sería:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{e(V + IR_s)}{mkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

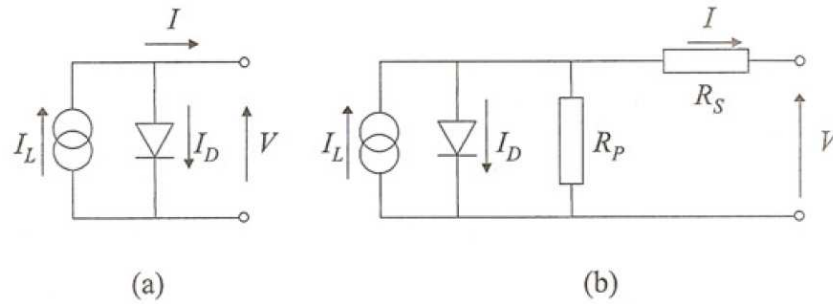


Figura 6: Circuitos equivalentes de una célula solar

Como consecuencia de esas resistencias, se producen pérdidas de rendimiento, en las que la tensión en circuito abierto se ve afectada fundamentalmente por la resistencia en paralelo (con pérdidas mayores cuanto menor es R_P) y la corriente de cortocircuito se ve afectada fundamentalmente por la resistencia en serie (con pérdidas mayores cuanto mayor es la resistencia en serie).

Se pueden observar los efectos de estas resistencias sobre la curva I-V característica en la siguiente figura.

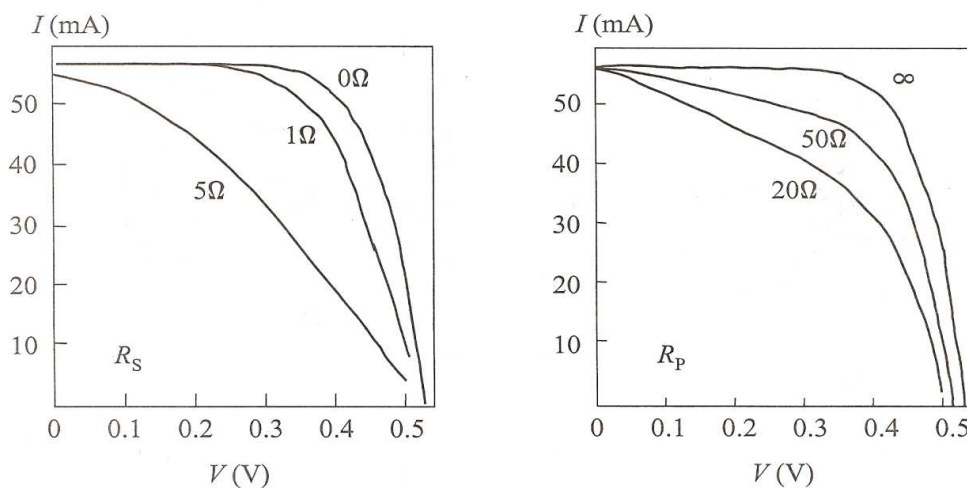


Figura 7: Variaciones de la curva característica por la resistencia serie (izquierda) y por la resistencia paralelo (derecha)

Observando la figura se puede afirmar que el efecto de la resistencia paralelo, cuando es suficientemente pequeña, es el de reducir la tensión de circuito abierto, sin afectar a la corriente de cortocircuito.

Por el contrario, una alta resistencia serie, reduce la corriente de cortocircuito, sin afectar a la tensión de circuito abierto. Con un buen diseño de la estructura la resistencia serie es más bien baja, no causando casi efecto sobre la corriente de cortocircuito.

2.6 EL MÓDULO FOTOVOLTAICO

Un módulo fotovoltaico es la unidad más pequeña que forma un generador fotovoltaico. El módulo es una unidad integral que proporciona soporte para un determinado número de células fotovoltaicas conectadas eléctricamente y protegidas de las condiciones medioambientales.

Uniando diferentes células solares fotovoltaicas en serie y en paralelo para obtener unos valores determinados de tensión y de corriente, tendremos un módulo fotovoltaico.

Esta unión de células, se realiza de manera que todo el conjunto quede bien unido e interconectado, y además quede protegido de las condiciones medioambientales.

La potencia eléctrica de un módulo fotovoltaico depende de su área activa, del número de células, de su interconexión eléctrica y de las condiciones de irradiancia y temperatura a que está sometido.

Se pueden encontrar módulos de diferentes tamaños y formas, y pueden estar hechos de diferentes materiales. Sin embargo el más comúnmente utilizado es el módulo plano “vidrio + EVA + Tedlar”.

El propósito de la estructura del módulo fotovoltaico es proporcionar un soporte rígido que proteja las interconexiones de las células del medioambiente.

El módulo fotovoltaico consta de los siguientes elementos:

- Cubierta frontal de vidrio.

- Las células con sus conectores: Para recolectar la corriente, en ambas caras de la célula se colocan contactos metálicos, uno en la cara p y otro en la n. En la cara n, la que estará expuesta al sol, los contactos eléctricos se realizan por medio de contactos de rejilla, para tener una buena distribución, perjudicando lo menos posible la entrada de fotones. La corriente recogida por la rejilla se lleva a dos buses o cintas, que llevan la corriente a la siguiente célula.

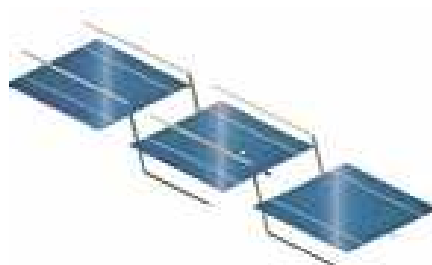


Figura 8: Conexión entre células

- Cubierta posterior: Va adosada a toda la superficie del módulo, y suele ser de película de Tedlar.

- Encapsulante: Es un polímero transparente y termoplástico, que debe ser resistente a la fatiga térmica, y a la abrasión. El más utilizado es el Etilen Vinil Acetato (EVA).

- Todo el conjunto va incrustado en un marco de Aluminio.
- Caja de conexiones externa, que dispone de dos bornes de salida.

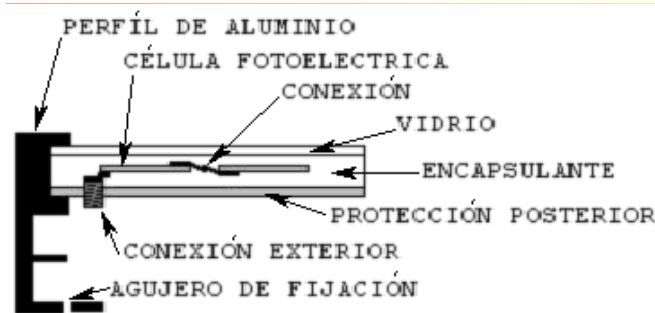


Figura 9: Corte de un módulo fotovoltaico.

2.7 PARÁMETROS QUE DEFINEN EL FUNCIONAMIENTO DE UN MÓDULO FOTOVOLTAICO

Los módulos, al igual que las células, también presentan su curva característica. Se puede considerar que tanto una célula solar, como un módulo, pueden caracterizarse por la siguiente ecuación:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{e(V + IR_s)}{mkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

Entre la célula y el módulo los parámetros serán diferentes, aunque habrá una relación entre ellos, que será el número de elementos en serie y en paralelo.

La corriente que se generará en un módulo será:

$$I_{\text{módulo}} = N_p \times I_{\text{célula}}$$

Siendo N_p el número de células en paralelo.

La tensión que se generará en un módulo será:

$$V_{\text{módulo}} = N_s \times V_{\text{célula}}$$

Siendo N_s el número de células en serie.

El funcionamiento del módulo fotovoltaico se ve afectado por la intensidad de la radiación y de la temperatura. La figura 10 muestra el comportamiento de la corriente producida en función del voltaje para diferentes intensidades de la radiación solar. Se presenta un aumento proporcional de la corriente producida con el aumento de la intensidad. También se debe observar que el voltaje a circuito abierto V_{oc} , no cambia lo cual demuestra su estabilidad frente a los cambios de iluminación. En la figura 11 se muestra el efecto que produce la temperatura sobre la producción de corriente en el módulo. Esta vez, el efecto se

manifiesta en el voltaje del módulo. La potencia nominal se reduce aproximadamente 0.5% por cada grado centígrado por encima de 25 °C.

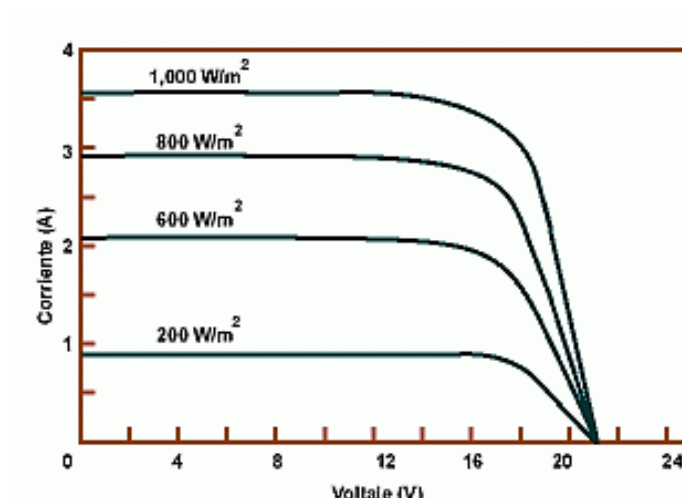


Figura 10: Curvas I-V para distintos niveles de irradiancia.

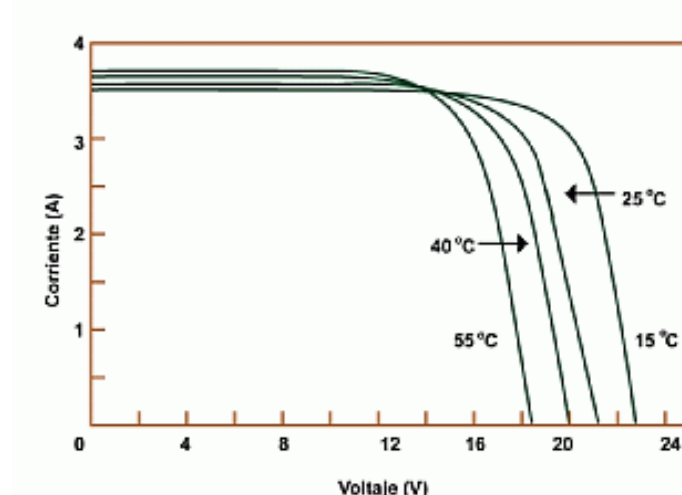


Figura 11: Curvas I-V para distintos niveles de temperatura

2.8 DIODOS DE PASO

Para evitar los problemas que puede ocasionar una iluminación no uniforme, la presencia de sombras u otros factores que pueden hacer que una parte del generador fotovoltaico trabaje en distintas condiciones que el resto se recurre al empleo de protecciones. Los diodos de paso se colocan en paralelo en asociaciones de células fotovoltaicas en serie, para impedir que todos los elementos de la serie se descarguen sobre una célula que resulte sombreada. Estas asociaciones de células en serie reciben el nombre de string.

La figura 12 muestra esquemáticamente el modo de funcionamiento de un diodo de paso. Aquí se han colocado diodos sobre cuatro ramas de células conectadas en serie, el diodo se conecta con polaridad opuesta a la de las células, de manera que si éstas trabajan

correctamente, por el diodo no pasa corriente. Si una de las tiras en serie resulta severamente sombreada de forma que invierte su polaridad, la polaridad del diodo cambiará, con lo que puede conducir ofreciendo un camino fácil para que pase la corriente generada por el resto de los grupos de células. Además, en el caso de que se sombrease una célula sólo se descargarían sobre ella el resto de las células que están en el mismo string, con lo que dependiendo del número de células que se pongan por diodo se puede limitar la cantidad de potencia a disipar por una célula, y por tanto su temperatura.

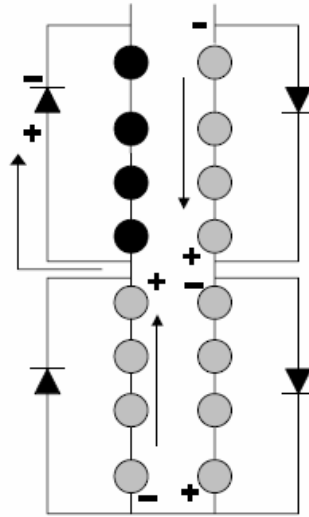


Figura 12: Esquema del modo de funcionamiento de un diodo de paso

Por último, los diodos de paso que se conectan en las ramas en serie han de ser capaces de soportar los valores de corriente y voltaje que ocasionalmente pudieran circular por ellos sin elevar su temperatura excesivamente ni deteriorarse. Como norma general se toma que el diodo sea capaz de soportar dos veces la I_{sc} de la rama sobre la que estén colocados, es decir como los valores de I_{sc} de las células comerciales suelen estar comprendidos entre 3 y 7 A, habrán de soportar unos 6-14 A lo que es un valor relativamente pequeño. Para el caso del voltaje se toma el doble de la V_{oc} del voltaje final del campo fotovoltaico, pero como esto no lo puede conocer el fabricante a priori, se suelen emplear diodos con valores lo suficientemente altos en torno a unos 600V.

Capítulo 3

Análisis teórico

3.1 INTRODUCCIÓN

Para la realización de este estudio se ha utilizado un módulo del fabricante Yingli Solar. El módulo está formado por 48 células (6x8 células) de silicio policristalino conectadas en serie. En la tabla 1 se muestran sus características:

Potencia máxima [W]	170
Tolerancia de Pmax [%]	+/- 3
Eficiencia del módulo [%]	13,1
Tensión de Pmax, Vmpp [V]	23,0
Intensidad de Pmax, Impp [A]	7,39
Tensión a circuito abierto Voc [V]	29,0
Corriente de cortocircuito Isc [A]	8,10
Tensión máxima del sistema [V]	1.000 VDC
NOCT [°C]	46
Peso [kg]	15,8
Dimensiones módulo [mmxmmxmm]	1310 x 990 x 50
Dimensiones célula [mmxmm]	156x156

Tabla 1: Características del módulo YL170

Es necesario utilizar una nomenclatura para poder identificar las diferentes células del módulo. Para ello se han nombrado las columnas con letras de la A a la F y las filas por números del 1 al 8. De esta forma se podrá localizar cada célula sin dificultad. Por ejemplo, la célula C3 es la célula de la columna C y de la fila 3.

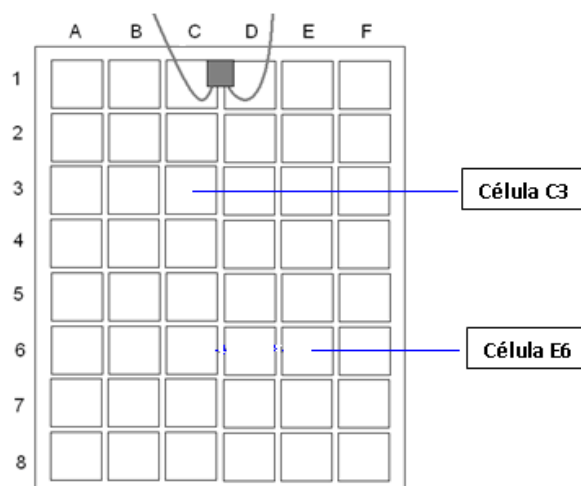


Figura 13: Nomenclatura de las células del módulo elegido.
Vista posterior del módulo.

3.2 SELECCIÓN DE CÉLULAS

Se tomará como referencia el PFC [ITU 11], donde se han estudiado en el laboratorio varias células del módulo anteriormente citado. Las curvas características I-V que se obtuvieron se muestran en la figura 14.

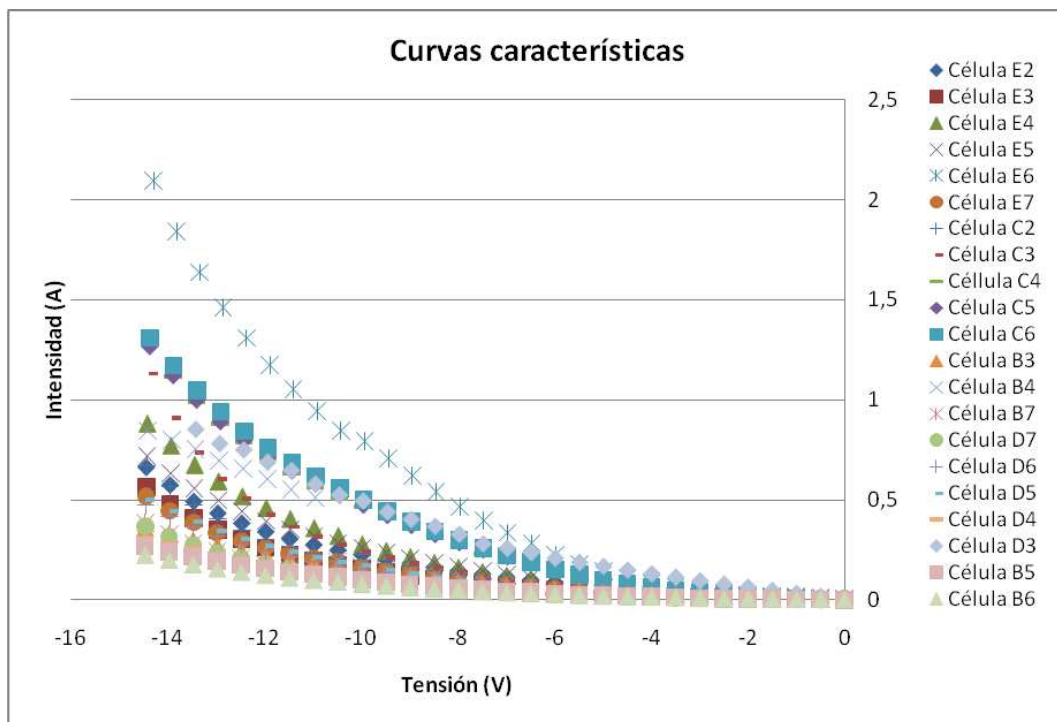


Figura 14: Curva característica I-V de varias células

Teniendo en cuenta que el módulo seleccionado ya había sido utilizado para otro tipo de ensayo y una de sus células (B5) presenta una fractura, se seleccionan tres células de tal manera que se puedan realizar strings de 8, 16 y 24 células por diodo sin coger la célula dañada.

Las tres células seleccionadas han sido: C3, C5 y E6. Sus curvas características I-V se muestran en la figura 15.

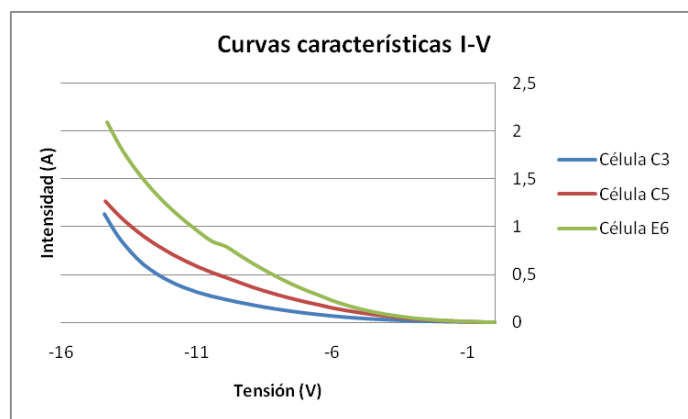


Figura 15: Curva característica I-V de varias células

3.3 CÁLCULO DE LA POTENCIA DISIPADA EN LA CÉLULA SOMBREADA

Para calcular la potencia que disipa una célula sombreada se realiza una simulación de su comportamiento dentro de un string formado por 8, 16 o 24 células en serie.

La potencia total que disipa la célula se calcula como:

$$P_{disipada} = \text{Radiación no convertida} + \text{Potencia eléctrica disipada}$$

La radiación no convertida es la radiación incidente en la parte de la célula que no está sombreada menos la radiación reflejada. Para calcular la radiación incidente se multiplica la irradiancia que recibe la célula por el área sin sombrear de la célula que esta sombreada, es decir, se multiplica la irradiancia por el área total de la célula, A, y por (1- factor de sombreado).

La radiación reflejada es la parte de la radiación incidente que no es absorbida por la célula. El valor del coeficiente de reflexión se obtiene de las referencias [JON 01] y [LOR 94] y es de 0.2. Por tanto si agrupamos los dos términos obtenemos:

$$\begin{aligned} \text{Radiación no convertida} &= \text{Irradiancia} \cdot A \cdot (1-FS) - \text{Irradiancia} \cdot A \cdot (1-FS) \cdot 0.2 \\ &= \text{Irradiancia} \cdot A \cdot (1-FS) \cdot (1-0.2) \end{aligned}$$

La potencia eléctrica disipada es la potencia que el resto de células del string entregan a la célula sombreada. Para realizar su cálculo, se simula la curva I-V de todas las células pertenecientes al string, la curva I-V de la célula sombreada y la curva I-V de todas las células del string menos la sombreada. Para simular estas curvas se utiliza el modelo de célula solar más un término que tiene en cuenta la ruptura por avalancha del diodo a tensiones muy negativas obtenido de la referencia [ALO 06]. La relación entre V e I es la siguiente:

$$f(V, I) = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{(V + IR_S)}{mV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_S}{R_P} - a \left(\frac{V + IR_S}{R_P} \right) \left(1 - \frac{V + IR_S}{V_{Br}} \right)^{-n} - I = 0$$

Donde:

I_L : Corriente luminosa

I_0 : Corriente de saturación del diodo

m: Factor de idealidad del diodo

R_S : Resistencia serie

R_P : Resistencia paralelo

$K=1.38e-23$: Constante de Boltzmann

T: Temperatura (K)

$e=1.602176462e-19$: Carga del electrón

$V_T=K*T/e$: Tensión térmica

V_{Br} : Tensión de ruptura (varía entre -15V y -50V)

a: Factor de corrección (varía entre 0 y 1)

n: Exponente de la ruptura por avalancha (varía entre 1 y 10)

Los valores de la tensión de ruptura y de la resistencia en paralelo son tomados del PFC [ITU 11], ya que fueron calculados en dicho proyecto y son diferentes para cada célula. Los datos extraídos se muestran en la siguiente tabla:

Célula	R_p	V_{Br}
C3	136,99 Ω	-15,56 V
C5	58,48 Ω	-17,22 V
E6	42,37 Ω	-17,101 V

Tabla 2: Valores de la resistencia en paralelo y de la tensión de ruptura para las células C3, C5 y E6.

Para el resto de valores se decide obtener la curva característica I-V del módulo utilizando una carga capacitiva, específica para medir este tipo de curvas. Con esta curva obtenemos la corriente de cortocircuito real del módulo.

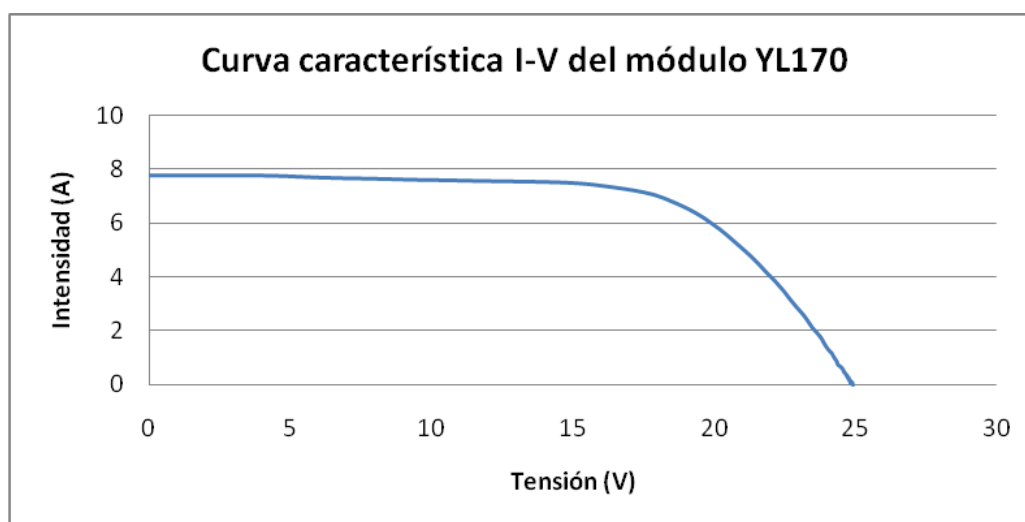


Figura 16: Curva característica I-V del módulo YL170

Para calcular el valor de la resistencia en serie, denotamos a la pendiente en torno a V_{oc} de la siguiente manera:

$$R_{so} = -\left(\frac{\partial V}{\partial I}\right)_{V=V_{oc}}$$

A partir de aquí se puede obtener la siguiente expresión analítica de la resistencia en serie:

$$R_s = R_{so} - \frac{mV_T}{I_o} \cdot \exp\left(-\frac{V_{oc}}{mV_T}\right)$$

Donde:

V_{oc} : Tensión a circuito abierto

I_o : Corriente de saturación del diodo

m : Factor de idealidad del diodo

$V_T = kT/e$: Tensión térmica (siendo k la constante de Boltzmann, T la temperatura (K) y e la carga del electrón)

Los parámetros utilizados para la simulación fueron los siguientes:

Célula	I_{SC}	I_0	R_s	R_p	V_{Br}	a	n
C3	7.79 A	1,8E-8 A	0,02 Ω	136,99 Ω	-15,56 V	0,6	2
C5	7.79 A	1,8E-8 A	0,02 Ω	58,48 Ω	-17,22 V	0,6	2
E6	7.79 A	1,8E-8 A	0,02 Ω	42,37 Ω	-17,101 V	0,6	2

Tabla 3: Parámetros utilizados para la simulación

A partir del modelo de célula solar obtenido se realiza una simulación del comportamiento de una célula solar sombreada y una célula sin sombrear dentro de un string formado por 8, 16 o 24 células conectadas en serie. La simulación se realiza para diferentes valores de irradiancia. En cada caso, el factor de sombreado varía desde el 5% hasta el 100%. El resto del string se considera perfectamente iluminado.

A continuación se muestra un ejemplo de la simulación de las curvas características I-V. En la figura 17 se representa en rojo la curva I-V de un string de 8 células con una sombreada y en azul la curva I-V de siete células pertenecientes al string sin sombrear y la curva I-V de la célula sombreada, para una irradiancia de 1000 W/m² y un factor de sombreado del 40%. La potencia eléctrica disipada se obtiene en la intersección de las curvas en color azul. Esta gráfica se obtiene para cada factor de sombreado.

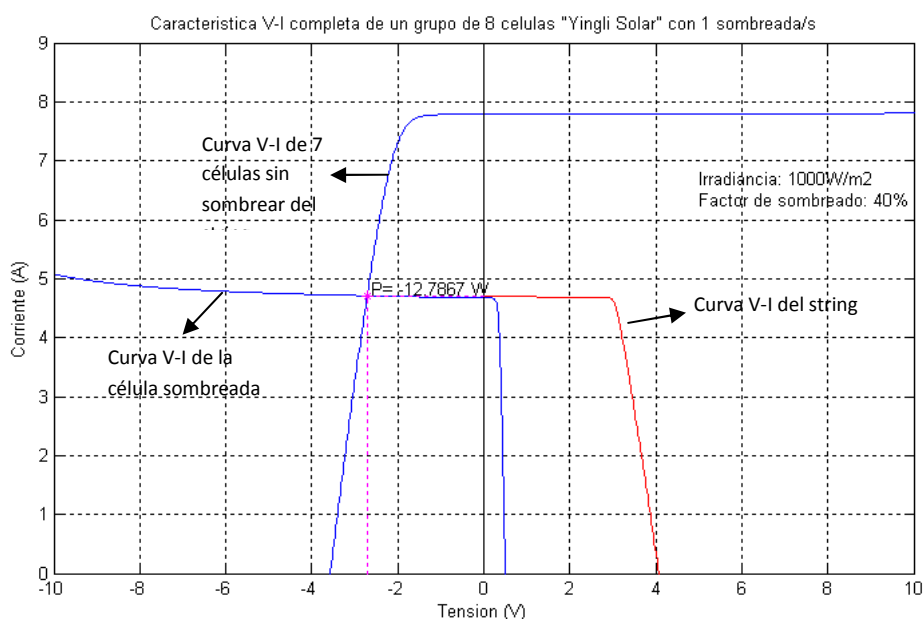


Figura 17: Curva característica I-V de un string de 8 células con una sombreada

En la figura 18 se observa la curva característica de una célula perteneciente al string sin sombrear para una irradiancia de 1000 W/m². También se representa, con un punto rosa, la potencia que cede a la célula sombreada para un factor de sombreado del 40%. Esta simulación se obtiene para cada factor de sombreado obteniendo así la potencia que cede la célula sin sombrear en función de este factor.

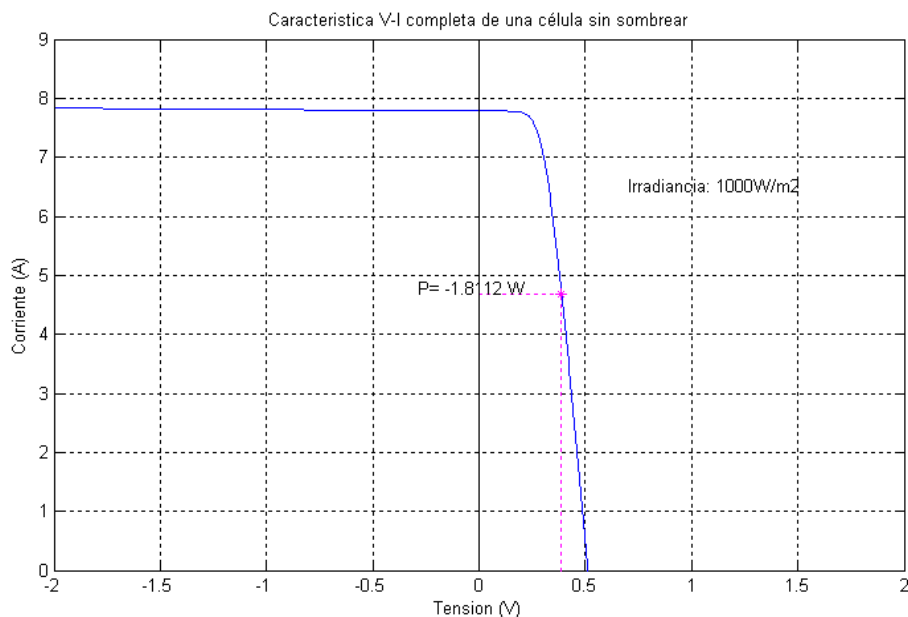


Figura 18: Curva característica I-V de una célula sin sombrear

En la simulación se obtiene la potencia eléctrica y la potencia total disipada por la célula sombreada en cada uno de los posibles máximos de potencia que pueda presentar la configuración considerada y la potencia que cede una célula sin sombrear del string.

Factor de sombreado	Potencia total disipada (W)	Potencia eléctrica disipada (W)	Potencia cedida por una célula (W)
20%	30,34	14,76	2.09
40%	24,48	12,79	1.81
60%	17,31	9,52	1.34
80%	9,18	5,29	0.74

Tabla 4: Datos obtenidos de la simulación

En la tabla 4 se muestran los valores obtenidos en la simulación para cada factor de sombreado (primera columna). En la segunda columna se observan los valores de la potencia total que disipa la célula sombreada, es decir, la suma de la potencia eléctrica disipada por la célula sombreada (tercera columna) y la radiación no convertida. En la cuarta columna se tienen los valores de la potencia que cede una célula perteneciente al string sin sombrear.

3.4 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA QUE ALCANZA LA CÉLULA SOMBREADA

El cálculo de la temperatura que alcanza la célula sombreada se realiza mediante dos balances de energía. Primero se realiza un balance a una célula perteneciente al string sin sombrear para calcular la temperatura que alcanza dicha célula y posteriormente se realiza un balance a la célula sombreada.

Para el balance de la célula sin sombrear se tiene en cuenta la radiación no convertida, la potencia que la célula va a ceder a la célula sombreada y el efecto de la convección sobre dicha célula. Teniendo en cuenta estos factores se obtiene el siguiente balance:

$$\underbrace{G \cdot A \cdot (1 - 0.2)}_{\text{Radiación no convertida}} - \underbrace{I \cdot V}_{\text{Potencia eléctrica que cede}} = \underbrace{h \cdot A \cdot (T_{cs} - T_a)}_{\text{Término de convección}}$$

Donde:

G: Irradiancia que llega a la célula (W/m²)

A: Área de la célula (m²)

I: Intensidad que circula por la célula (A)

V: Tensión de la célula (V)

h: Coeficiente de convección (W/m² °C)

T_a: Temperatura ambiente (°C)

T_{cs}: Temperatura de la célula del string sin sombrear (°C)

Con este balance podemos calcular la temperatura de la célula perteneciente al string que luego será necesaria para calcular la temperatura de la célula sombreada.

A la célula sombreada se le aplica también un balance de energía pero en este caso se tendrá también en cuenta los términos debidos a la conducción ya que aparecen diferencias importantes de temperatura entre esa célula y las contiguas que en el caso anterior no se tenían.

El balance que se realiza a la célula sombreada es el siguiente:

$$\underbrace{G \cdot A \cdot (1 - FS) \cdot (1 - 0.2)}_{\text{Radiación no convertida}} + \underbrace{P_{\text{edispada}}}_{\text{Potencia eléctrica disipada}} - \underbrace{\frac{T_C - T_{CS}}{\Delta x} \cdot k_{si} \cdot L \cdot e - \frac{T_C - T_{CS}}{\Delta x} \cdot k_{EVA} \cdot L \cdot e - 2 \cdot \frac{T_C - T_{CS}}{\Delta x} \cdot k_{EVA} \cdot L_C \cdot e}_{\text{Términos de conducción}} = \underbrace{h \cdot A \cdot (1 - FS) \cdot (T_C - T_a)}_{\text{Término de convección}}$$

Donde:

G: Irradiancia que llega a la célula (W/m²)

A: Área de la célula (m²)

I: Intensidad que circula por la célula (A)

V: Tensión de la célula (V)

h: Coeficiente de convección (W/(m²·°C))

T_a: Temperatura ambiente (°C)

T_{cs}: Temperatura de la célula sin sombrear (°C)

T_C: Temperatura de la célula sombreada (°C)

FS: Factor de sombreado

k_{Si} : Conductividad del silicio ($W/(m \cdot ^\circ C)$)

k_{EVA} : Conductividad del EVA ($W/(m \cdot ^\circ C)$)

e: Espesor de la célula (m)

Δx : Espesor en la dirección de la conducción (m)

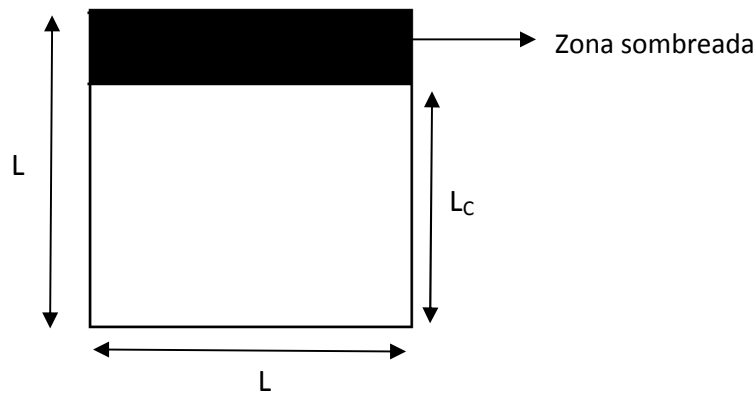


Figura 19: Célula sombreada

Para calcular el coeficiente de convección hay que tener en cuenta que se tiene una convección forzada por la parte frontal y posterior de la célula y una convección natural.

El coeficiente de convección forzada de la parte posterior y frontal se calcula a partir de los números de Reynolds y Nusselt para flujo laminar paralelo a una placa plana, ya que la longitud de la célula no es lo suficientemente larga para que el flujo se vuelva turbulento, y un número de Reynolds menor que $5 \cdot 10^5$ (los valores calculados del número de Reynolds se encuentran en el anexo). Para ello se utilizan las siguientes formulas:

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{viento} \cdot L_c}{\mu} \implies Nu = 0.664 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{1/3} \implies h = \frac{Nu \cdot k}{L_c}$$

Donde:

Re: número de Reynolds

ρ : densidad del aire (kg/m^3)

v_{viento} : velocidad del viento (m/s)

L_c : longitud característica (m)

μ : viscosidad dinámica ($kg/(m \cdot s)$)

Nu: número de Nusselt

Pr: número de Prandtl

k: conductividad térmica ($W/(m \cdot ^\circ C)$)

La temperatura ambiente varía entre $20^\circ C$ y $35^\circ C$ y las propiedades del aire a esas temperaturas casi no cambian, por lo que se toman constantes a $25^\circ C$.

La velocidad del viento en la parte posterior de la célula se toma como la mitad de la velocidad del viento en la parte frontal [TIN 08] y además esta aproximación se comprobó de

forma experimental midiendo con un anemómetro la velocidad del viento en la parte frontal y posterior del módulo. De esta manera se calculan dos coeficientes de convección forzada, uno para la parte posterior y otro para la parte frontal, y luego se suman obteniendo el coeficiente de convección forzada para toda la célula.

Para el cálculo del coeficiente de convección natural y el coeficiente global de convección se utiliza la referencia [ARM 10] donde se hace un estudio de un modelo térmico para paneles fotovoltaicos bajo diferentes condiciones atmosféricas. Se realiza un cálculo de los coeficientes de convección para diferentes velocidades de viento además de tener en cuenta otros factores atmosféricos.

Para la convección natural se toma como coeficiente el valor de 4.5, obtenido como una media de los resultados de [ARM 10], donde se calcula el valor del coeficiente de convección natural para diferentes valores de la velocidad del viento.

El coeficiente global de convección se calcula con una relación entre los coeficientes de convección anteriormente citados obtenida de [ARM 10]:

$$h_{global} = \sqrt[3]{h_{forzada}^3 + h_{natural}^3}$$

Con el valor del coeficiente de convección y los balances de energía, se puede calcular la temperatura que alcanza una célula sombreada en función de su factor de sombreado, irradiancia que le llega, velocidad del viento, temperatura ambiente y número de células por diodo.

Capítulo 4

Análisis experimental

4.1 EQUIPOS UTILIZADOS EN EL MONTAJE

Cámara Termográfica: Es muy importante, para que la medida sea lo más exacta posible, conocer la temperatura de cada lugar con cierta precisión. Por ello es necesaria una cámara de estas características. La cámara, de la marca Fluke, es propiedad de la UPNA (Dpto. Ingeniería Eléctrica y Electrónica).



Figura 20: Cámara termográfica

Para calibrar la cámara termográfica se coloca una PT1000 sobre una célula para obtener el valor de la temperatura de la misma y se observa con la cámara termográfica la misma célula. Se regula la cámara hasta que los valores de temperatura medidos con la PT1000 y la cámara termográfica coinciden.

Polímetros o Multímetros: En todo trabajo electrónico o eléctrico es necesario un polímetro para medir en según qué situaciones diversas variables como son tensión, intensidad, resistencia, etc. En este caso se utilizarán dos polímetros para medir intensidad y tensión de la célula sombreada y de esta manera poder calcular la potencia que disipa la misma.



Figura 21: Polímetros

Carga Capacitiva: Es un instrumento específico para medir la curva I-V de los módulos, series o generadores fotovoltaicos. Se utilizará para medir la curva I-V real del módulo.



Figura 22: Carga Capacitiva

Anemómetro: Se utilizará para medir la velocidad del viento en la zona donde se encuentra colocado el módulo. La precisión de este aparato es de ± 0.1 m/s.



Figura 23: Anemómetro

Sensores de radiación (célula calibrada) y temperatura ambiente (termo-resistencia):

En los ensayos prácticos es necesario medir las condiciones ambientales de radiación y temperatura con los sensores adecuados. Se utilizará una célula fotovoltaica calibrada para medir la irradiancia y una termo-resistencia PT1000 de precisión para medir la temperatura ambiente. El sensor de radiación ha sido calibrado por NES Measuring Systems.

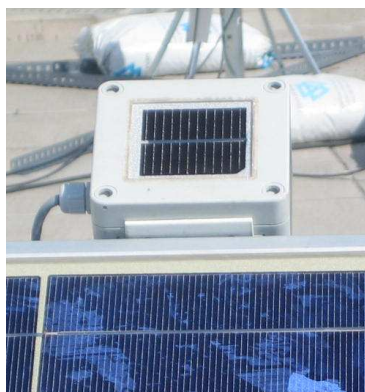


Figura 24: a) Célula calibrada



b) Termo-resistencia PT1000

4.2 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE

Primeramente se deben soldar, por la parte posterior del módulo, unos cables a las cintas colectoras de las células. Para soldar los cables se realiza una pequeña perforación al Tedlar hasta que se alcanza la cinta colectora. Con la ayuda de un soldador se suelda a cada cinta colectora un cable que servirá para realizar las medidas necesarias de tensión e intensidad además de poder cortocircuitar el número deseado de células de tal manera que se pueda elegir cuantas células por diodo se desean ensayar.

Se coloca el módulo en una estructura con una inclinación de 40° y se coloca en el borde superior la célula calibrada para medir la irradiancia que llega al módulo.

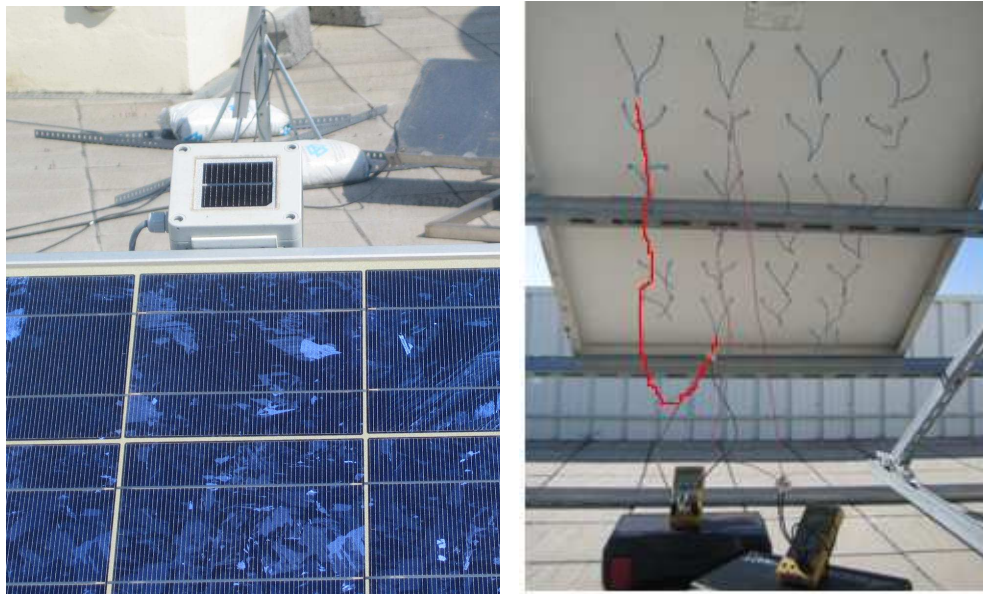


Figura 25: a) Célula calibrada

b) Módulo cortocircuitado

En la parte posterior del módulo se cortocircuitan, mediante un cable rojo, un número de células que formarán parte del string que se desea medir, dejando el resto del módulo en abierto. También se intercalará un amperímetro para medir la intensidad que circula por el string. Además se colocará un polímetro para medir la tensión de una célula perteneciente al string y otro para medir la tensión de la célula que posteriormente se sombreadá.

4.3 PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE MEDIDAS

Una vez realizado el montaje anteriormente citado se pasa a la toma de medidas. Para ello primeramente se selecciona una célula del módulo que va a ser sombreada. Para sombrear la célula se utiliza una cartulina blanca con las dimensiones deseadas, que se pone sobre la célula seleccionada y se sujeta con un poco de cello teniendo cuidado de que ni el cello ni la cartulina cubran las células colindantes. Se utiliza una cartulina blanca ya que es el color que más refleja. Además esta cartulina se calienta menos que si fuese de otro color y así la temperatura de la cartulina influye menos sobre la temperatura de la célula.

Una vez sombreada la célula se apuntan los valores de irradiancia, temperatura ambiente y velocidad del viento. Para tomar el valor de la temperatura ambiente se coloca la PT1000 a la sombra y procurando que no le dé el viento. La velocidad del viento se mide con el anemómetro, colocándolo cerca del módulo y en la dirección que sopla el viento.

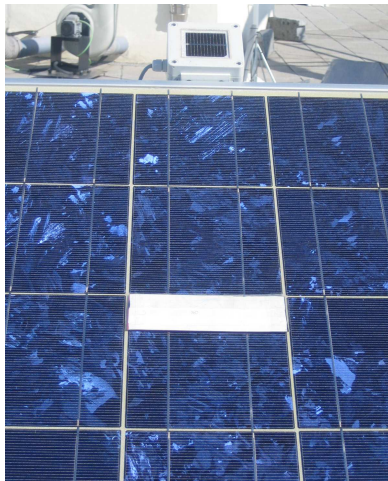


Figura 26: Sombreado del 30%

Después de dejar durante aproximadamente media hora la célula sombreada para que se estabilice, se procede a tomar las medidas necesarias. Primero se vuelve a apuntar la irradiancia, temperatura ambiente y velocidad del viento. Posteriormente se toman los valores de intensidad que circula por el string, tensión en la célula sombreada y tensión en la célula perteneciente al string sin sombrear. También se toman, por la parte posterior del módulo, fotografías con la cámara termográfica de ambas células para poder saber que temperatura alcanzan.

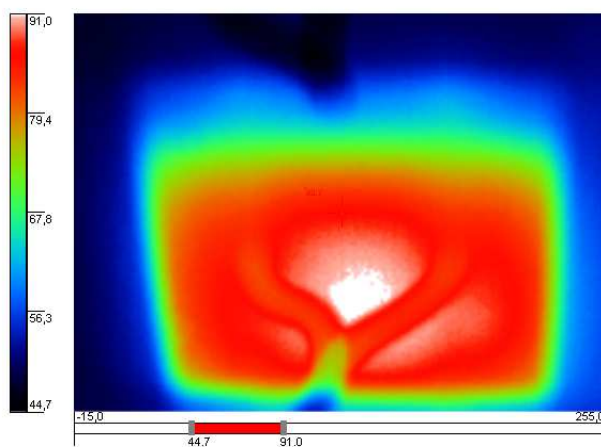


Figura 27: Imagen de la cámara termográfica

Tras la toma de medidas para un sombreado, se cambia el factor de sombreado y se vuelve a realizar el proceso anterior.

Capítulo 5

Resultados

5.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS ANÁLISIS TEÓRICO Y EXPERIMENTAL. VALIDACIÓN DEL MODELO.

Los datos experimentales y teóricos obtenidos de las células con los procedimientos anteriormente explicados se encuentran reflejados en el Anexo A. Para cada célula medida se obtuvo una tabla como la que se muestra a continuación:

célula C3 del string sombreada parcialmente

FS	Irradiancia (W/m ²)	T ambiente (°C)	V viento (m/s)	T (teórica) (°C)	Pdisip (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Pdisip (exp.) (W)	Diferencia T	Diferencia potencia
0,10	909	30,0	1,9	74,3	13,75	72,1	13,38	2,2	0,37
0,18	949	28,7	1,8	79,4	14,09	72,7	14,04	6,7	0,05
0,27	967	27,7	2,0	77,3	13,70	74,3	13,99	3	0,29
0,45	959	27,6	1,8	76,3	11,53	77,3	11,90	1	0,37
0,64	919	25,9	1,4	72,0	8,30	73,5	8,47	1,5	0,17
0,81	839	24,3	1,4	59,7	4,40	60,6	4,48	0,9	0,08

Tabla 5: Resultados para C3 perteneciente a un string de 8 células

célula C4 del string sin sombrear

Irradiancia (W/m ²)	T ambiente (°C)	V viento (m/s)	T (teórica) (°C)	Pcedida (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Pcedida (exp.) (W)	Diferencia T	Diferencia potencia
909	30,0	1,9	56,6	2,68	57,3	2,60	0,7	0,08
949	28,7	1,8	57,7	2,66	56,6	2,66	1,1	0,00
967	27,7	2,0	56,1	2,50	56,8	2,54	0,7	0,04
959	27,6	1,8	58,2	1,94	60,0	2,00	1,8	0,06
919	25,9	1,4	60,5	1,27	59,0	1,34	1,5	0,07
839	24,3	1,4	56,9	0,62	55,1	0,67	1,8	0,05

Tabla 6: Resultados para C4 perteneciente a un string de 8 células

En la primera tabla se muestra los valores de la temperatura que alcanza la célula sombreada y la potencia que disipa, calculadas teórica y experimentalmente en función del factor de sombreado, de la irradiancia que le llega, de la temperatura ambiente y del viento. Además se muestran las diferencias de temperatura y potencia entre los datos experimentales y los teóricos.

En la segunda tabla se muestran la temperatura y la potencia que cede una célula del string sin sombrear en función de los mismos parámetros que en el caso anterior, calculadas de forma teórica y experimental y sus correspondientes diferencias.

Como todo modelo que se realiza, éste requiere una validación para comprobar que, efectivamente, se ajusta a la realidad que pretende representar.

Para verificar el modelo empleado en este Proyecto Fin de Carrera se simulan los datos obtenidos empíricamente con el modelo teórico. Para ello se toman los datos de irradiancia, temperatura ambiente, velocidad del viento y factor de sombreado obtenidos en la toma de datos experimentales y se simulan con el modelo teórico, obteniendo los valores analíticos de temperatura y potencia que disipa la célula sombreada y la temperatura y potencia que cede la célula sin sombreadar perteneciente al string. Estos datos se comparan con los datos obtenidos en el análisis experimental. Para cada medida se calcula la diferencia entre el valor teórico y el experimental y se realiza una media obteniendo el error¹ medio cometido. Para cada error medio se calcula también su desviación típica, obteniendo un grado de dispersión de datos pequeño.

	Tª célula sin sombreadar	Tª célula sombreada	Potencia disipada	Potencia cedida
% error¹	3,12	5,51	1,24	2,62
Desviación típica	1,89	3,20	0,90	1,65

Tabla 7: Error cometido y desviación típica

Estos errores son debidos entre otros factores a que se han supuesto los valores de irradiancia, temperatura ambiente y velocidad del viento constantes, además de los errores cometidos en la toma de medidas debido a la precisión de los equipos y a que en los balances de energía se han despreciado algunos términos.

En las figuras 28 y 29 se pudo observar gráficamente el error cometido y como las curvas de temperatura y potencia del modelo teórico tienden a asemejarse a la forma de las curvas experimentales.

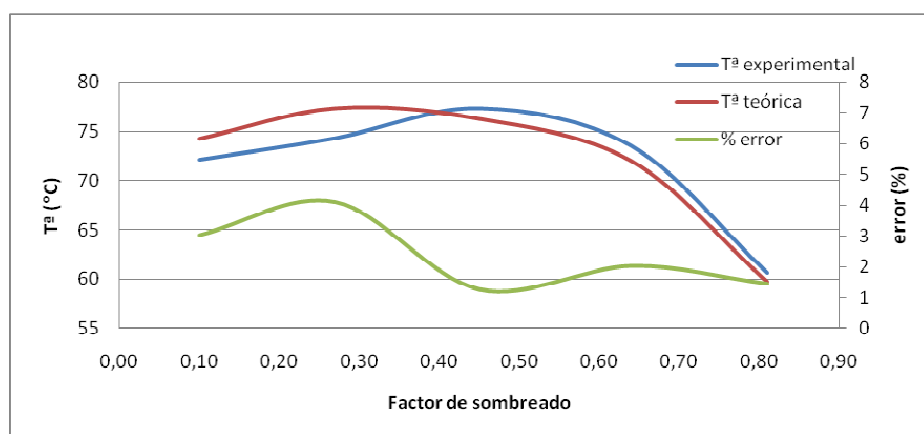


Figura 28: Gráfica: Tª experimental y teórica (eje izquierdo) vs factor de sombreado
% error (eje derecho) vs factor de sombreado

¹ Se denomina 'error' a la diferencia entre los valores experimental y teórico.

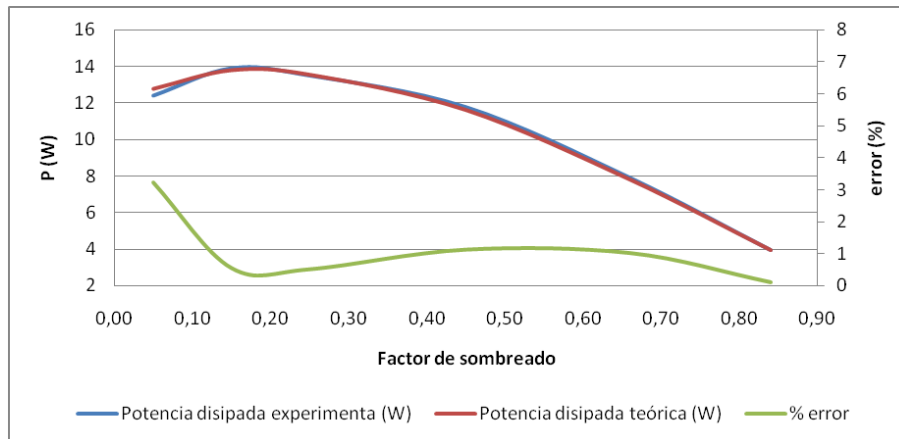


Figura 29: Gráfica: potencia disipada experimental y teórica (eje izquierdo) vs factor de sombreado % error (eje derecho) vs factor de sombreado

Tras observar los errores cometidos se llega a la conclusión que el modelo es válido para calcular la temperatura que alcanza una célula sombreada ya que el rango de errores está entre el 0%-10% y estos errores son aceptables.

5.2 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DEPENDIENDO DE VARIOS FACTORES

Como se ha visto en el apartado 1.1, el aumento de temperatura en la célula sombreada se debe a varios factores. En este apartado se va a analizar el aumento de temperatura en función de esos factores.

Para realizar el análisis, se representa en la figura 30, las curvas de nivel de temperatura que alcanza la célula sombreada en función del factor de sombreado y del número de células por diodo en unas determinadas condiciones (irradiancia: 1000W/m^2 , $T_a=40^\circ\text{C}$ y velocidad de viento: 2 m/s). Estas condiciones se han seleccionado porque son condiciones extremas, de esta manera se puede analizar uno de los casos más extremos que se puede alcanzar en la zona de Navarra, teniendo unos valores de irradiancia y temperatura ambiente elevados y una velocidad de viento moderada.

Para unos valores de irradiancia, temperatura ambiente, velocidad de viento y un número de células por diodo constantes, puede apreciarse, tras los análisis realizados, que la mayor temperatura se alcanza entre unos factores de sombreado del 20% y el 30%. Cuando se dan estos factores de sombreado, el punto de trabajo coincide con el punto de máxima potencia de las células no sombreadas, lo que era de esperar ya que en ese punto las células están generando su máxima potencia. También se observa que conforme aumenta el factor de sombreado se llega a un punto en el que la temperatura deja de aumentar y comienza a disminuir.

En el caso de que se analice la temperatura en función del número de células por diodo, manteniendo el resto de factores constantes, se llega a la conclusión que cuanto mayor es ese número de células mayor temperatura alcanzará la célula, ya que la potencia que disipa

la célula es mayor porque aumenta el número de células que le ceden potencia. De hecho, para un número de ocho células por diodo, para factores de sombreado menores que el 70%, si la temperatura ambiente es de 40 °C, la irradiancia 1000 W/m² y la velocidad del viento es de 2 m/s, se superan los 80°C. Además se puede observar que en estas condiciones desfavorables, para un número de células por diodo bajo ya se alcanzan temperaturas elevadas.

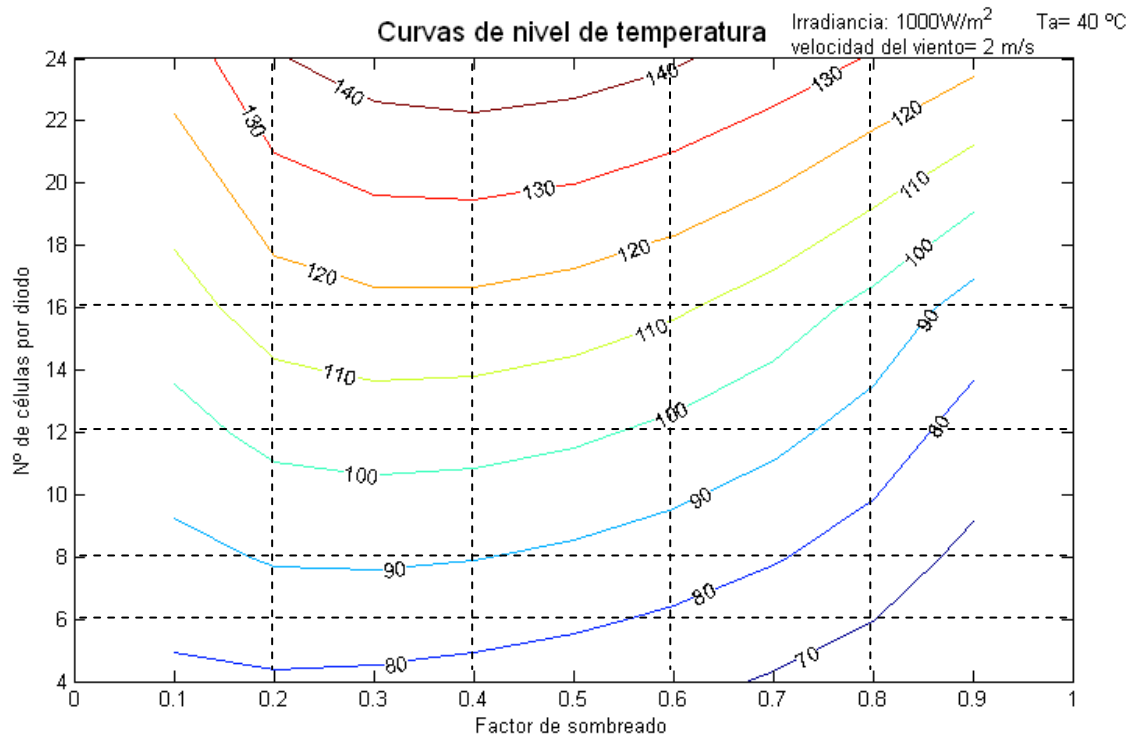


Figura 30: Curvas de nivel de temperatura

Como se muestra en la figura 31, la temperatura de la célula sombreada disminuye conforme aumenta la velocidad del viento. Para velocidades de entre 1-2 m/s, la temperatura disminuye 20°C por m/s, en cambio entre 2-3 m/s esta disminución es casi la mitad pasando de 20°C por m/s a 12°C por m/s. Conforme sigue aumentando la velocidad del viento, la disminución de temperatura es menor, estando comprendida entre 3-7°C por m/s.

Además para sombreados entre el 50% y el 90%, la relación entre temperatura y viento tiene la misma tendencia, en cambio conforme el factor de sombreado va disminuyendo ya no se observa esa tendencia tan clara. Esto es debido a que para factores de sombreado pequeños, el término de la conducción tiene mayor peso y para factores de sombreado mayores es el término de la convección. Por ello en la figura 31 se puede observar como para un sombreado del 10%, la temperatura para una velocidad de viento de 1 m/s es menor que para los factores de sombreado entre el 20% y el 70%.

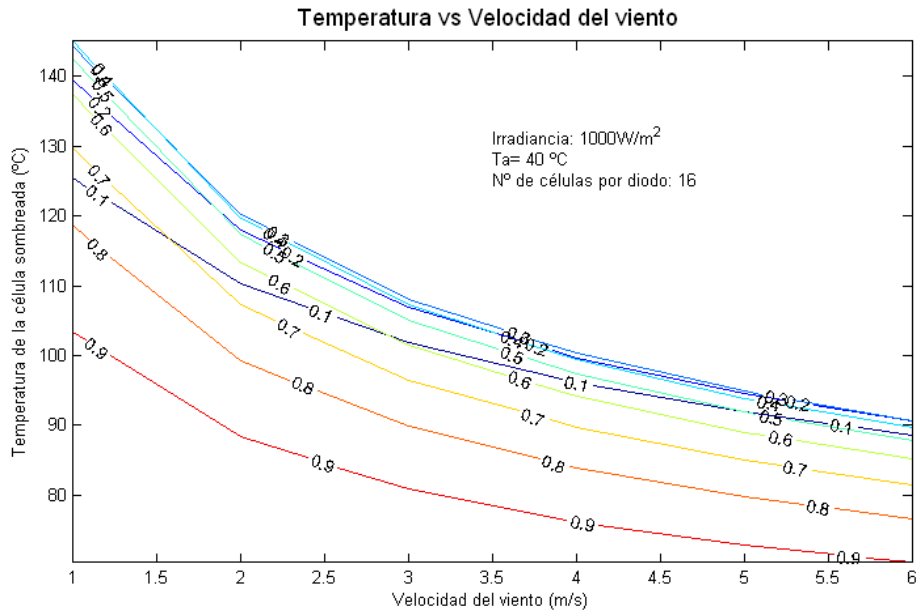


Figura 31: Gráfica temperatura vs velocidad del viento
(cada curva corresponde a un factor de sombreado)

5.3 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA POTENCIA DISIPADA DEPENDIENDO DE VARIOS FACTORES

La potencia que disipa la célula sombreada para unos determinados valores de irradiancia, temperatura ambiente y velocidad del viento, depende del factor de sombreado y del número de células por diodo.

Como se muestra en la figura 32, la potencia disipada aumenta con el número de células por diodo para un mismo factor de sombreado, como anteriormente se ha comentado. Además se observa que este aumento es lineal para factores de sombreado pequeños. Para factores de sombreado mayores del 70%, el aumento no es del todo lineal.

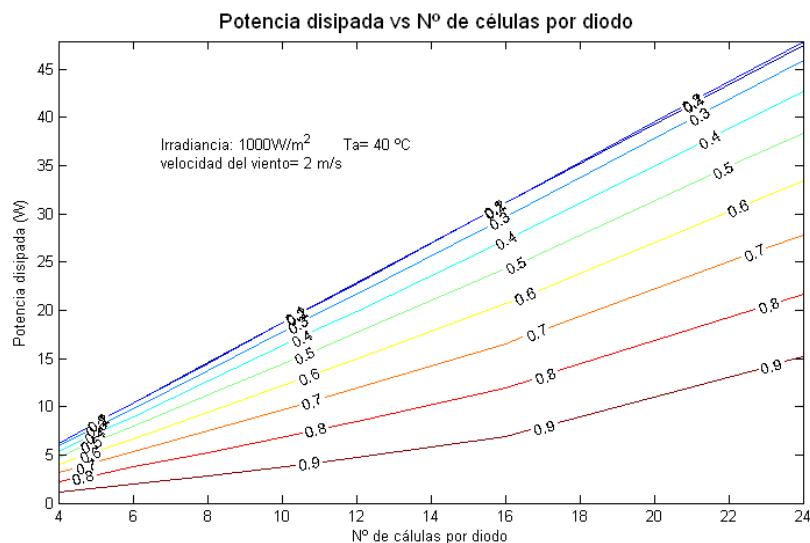


Figura 32: Gráfica potencia disipada vs Número de células por diodo
(cada curva corresponde a un factor de sombreado)

En el caso de la dependencia de la potencia disipada con el factor de sombreado ocurre lo contrario. La potencia disminuye conforme aumenta el sombreado, es decir, para un string de 24 células, con un factor de sombreado del 90% se tiene una potencia disipada de 15 W, en cambio con un sombreado del 10% se tiene una potencia de 50W.

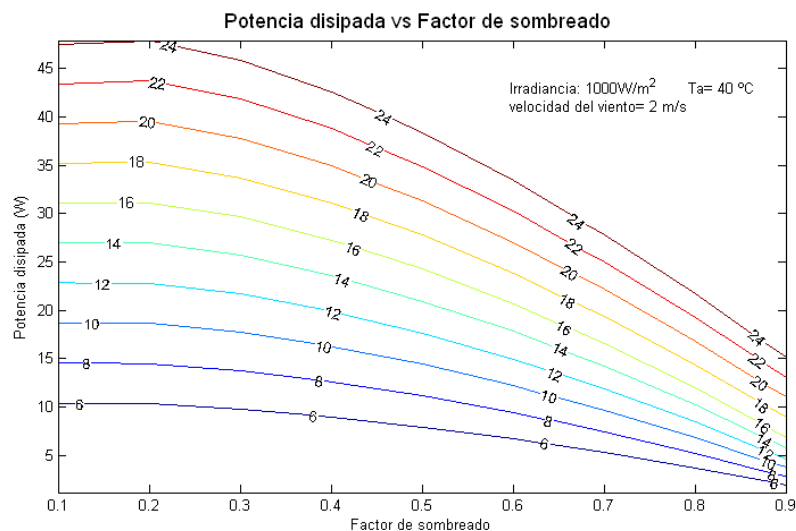


Figura 33: Gráfica potencia disipada vs Factor de sombreado (cada curva corresponde a un número de células por diodo)

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras

6.1 CONCLUSIONES

De los análisis realizados en este proyecto se pueden extraer una serie de conclusiones:

- Se ha propuesto un modelo teórico que se ha validado con un rango de errores comprendido entre el 0%-10%. El error medio cometido en el cálculo de la temperatura de la célula sombreada ha sido de 5.51% con una desviación típica de 3.20. Con este modelo se podrán analizar otros casos sin necesidad de recurrir a ensayos prácticos específicos.
- Tras comprobar experimentalmente diferentes modelos se llega a la conclusión que los términos de conducción y de convección no son despreciables en el caso de una célula sombreada, teniendo más peso el término de conducción en sombreados pequeños y el término de convección en sombreados mayores.
- Para unos valores determinados de irradiancia, temperatura ambiente, velocidad del viento y número de células por diodo se observa que la temperatura de la célula sombreada alcanza su máximo valor para un sombreado entre el 20% y el 30%, coincidiendo, el punto de trabajo, con el punto de máxima potencia de las células no sombreadas.
- La temperatura de la célula sombreada aumenta con el número de células por diodo, ya que la potencia que ceden estas células a la célula sombreada es mayor. Además en condiciones desfavorables (irradiancia 1000 W/m^2 , $T_a = 40^\circ\text{C}$ y velocidad del viento: 2 m/s) para ocho células por diodo la célula sombreada alcanza una temperatura superior a 90°C para algunos factores de sombreado, es decir, con un número bajo de células por diodo y unas condiciones desfavorables se pueden tener temperaturas demasiado elevadas para algunos factores de sombra.
- La temperatura de la célula sombreada disminuye conforme aumenta la velocidad del viento. Para velocidades bajas de viento entre $1\text{-}2 \text{ m/s}$ disminuye 20°C por m/s , en cambio conforme la velocidad del viento aumenta esta disminución de temperatura es menor llegando a ser de $3\text{-}7^\circ\text{C}$ por m/s para velocidades de $3\text{-}6 \text{ m/s}$. Además para sombreados entre el 50% y el 90%, la relación entre temperatura y viento tiene la misma tendencia, en cambio conforme el factor de sombreado va disminuyendo ya no se observa esa tendencia tan clara. Esto es debido a que en unos casos domina el efecto de la conducción y en otros el de la convección, como anteriormente se ha mencionado.

- La potencia disipada aumenta casi de forma lineal con el número de células por diodo para un mismo factor de sombreado.
- Conforme aumenta el factor de sombreado, la potencia disipada disminuye para un string con un número de células determinado.

6.2 LÍNEAS FUTURAS

En este Proyecto Fin de Carrera se ha analizado qué pasa con la temperatura cuando la potencia, es decir, la corriente, se reparte de forma uniforme por toda la célula. Como línea futura está el caso en el que la potencia no se reparte de forma uniforme y por lo tanto exista un punto caliente. En este caso se debería calcular la distribución de temperatura teniendo en cuenta que existen puntos en la célula con una temperatura elevada, superior al resto de la célula y por tanto la distribución de temperatura no será uniforme.

Bibliografía

- [LOR 94] Eduardo Lorenzo, "ELECTRICIDAD SOLAR FOTOVOLTAICA".
- [ITU 11] Resu Iturri Buzunáriz, "REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CARACTERIZACIÓN DE CÉLULAS SOLARES EN POLARIZACIÓN INVERSA". PFC 2011.
- [MAY 10] Iosu Mayo Blasquiz, "ANÁLISIS DEL FENÓMENO DE LOS PUNTOS CALIENTES EN MÓDULOS FOTOVOLTAICOS". PFC 2010.
- [ARM 10] S. Armstrong, W.G. Hurley, "A THERMAL MODEL FOR PHOTOVOLTAIC PANELS UNDER VARYING ATMOSPHERIC CONDITIONS"
- [WOH 05] Wohlgemuth, John; Herrmann, Werner, "HOT SPOT TESTS FOR CRYSTALLINE SILICON MODULES" 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 2005, January 3, 2005 - January 7, 2005.
- [HER 97] Herrmann, W.; Wiesner, W.; Vaassen, W., "HOT SPOT INVESTIGATIONS ON PV MODULES-NEW CONCEPTS FOR A TEST STANDARD AND CONSEQUENCES FOR MODULE DESIGN WITH RESPECT TO BYPASS DIODES" Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p 1129-1132, 1997.
- [HER 99] W.Herrmann, M. Adian; W.Wiesner, "OPERATIONAL BEHAVIOUR OF COMMERCIAL SOLAR CELLS UNDER REVERSE BIASED CONDITINS".
- [DAN 97] Danner, M.; Buecher, K., "REVERSE CHARACTERISTICS OF COMMERCIAL SILICON SOLAR CELLS – IMPACT ON HOT SPOT TEMPERATURES AND MODULE INTEGRITY" Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p 1137-1140, 1997.
- [ALO 03] Alonso-García, M.C.; Herrmann, W.; Böhmer, W.; Proisy, B., "THERMAL AND ELECTRICAL EFFECTS CAUSED BY OUTDOOR HOT-SPOT TESTING IN ASSOCIATIONS OF PHOTOVOLTAIC CELLS" Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v 11, n 5, p 293-307, August 2003.
- [ALO 06] Alonso-García, M.C; Ruíz, J.M; "ANALYSIS AND MODELLING THE REVERSE CHARACTERISTIC OF PHOTOVOLTAIC CELLS" Source: Solar Energy Materials and Solar Cells, v 90, n 7-8, p 1105-1120, May 5, 2006.
- [BRE 03] Breitenstein, O.; Rakotoniaina, J.P.; Neve, S.; Al Rifai, M.H.; Werner, M., "SHUNT TYPES IN MULTICRYSTALLINE SOLAR CELLS" Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, v A, p 987-990, 2003.
- [JON 01] A.D. Jones;C.P.Underwood, "A THERMAL MODEL FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS"
- [TIN 08] G.M. Tina; Abate R., "EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THERMAL BEHAVIOUR OF PHOTOVOLTAICMODULES"

Anexo

Tablas de resultados

8 células por diodo

Célula C3 del string sombreada parcialmente

FS	Irradiancia (W/m ²)	T (teórica) (°C)	Pdisip (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Ta (exp.) (°C)	% error T	Pdisip (exp.) (W)	% error pot	V viento (m/s)	Re	Nusselt	h (W/m ² ·°C)	Re atrás	Nusselt atrás	L _c (m)
0,10	909	74,3	13,75	72,1	30,0	3,04	13,38	2,75	1,9	17212,50	78,42	24,45	8606,25	55,45	0,14
0,18	949	79,4	14,09	72,7	28,7	9,19	14,04	0,37	1,8	13831,48	70,30	25,56	6915,74	49,71	0,12
0,27	967	77,3	13,70	74,3	27,7	4,11	13,99	2,04	2,0	14087,61	70,95	28,13	7043,81	50,17	0,11
0,45	959	76,3	11,53	77,3	27,6	1,27	11,90	3,10	1,8	9220,984	57,40	31,28	4610,49	40,59	0,08
0,64	919	72,0	8,30	73,5	25,9	2,03	8,47	2,03	1,4	4482,43	40,02	34,88	2241,21	28,30	0,05
0,81	839	59,7	4,40	60,6	24,3	1,45	4,48	1,78	1,4	2689,45	31,00	45,01	1344,73	21,92	0,03

Célula C4 del string sin sombrear

Irradiancia (W/m ²)	T (teórica) (°C)	Pcedida (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Ta (exp.) (°C)	% error T	Pcedida (exp.) (W)	% error pot	V viento (m/s)	Re	Nusselt	h (W/m ² ·°C)	Re atrás	Nusselt atrás
909	56,6	2,68	57,3	30,0	1,16	2,60	3,11	1,9	19179,65	82,78	23,17	9589,82	58,54
949	57,7	2,66	56,6	28,7	1,89	2,66	0,11	1,8	17980,92	80,16	22,44	8990,46	56,68
967	56,1	2,49	56,8	27,7	1,26	2,54	1,91	2,0	19978,80	84,49	23,64	9989,40	59,74
959	58,2	1,94	60,0	27,6	2,93	2,00	2,85	1,8	17980,92	80,16	22,44	8990,46	56,68
919	60,5	1,26	59,0	26,0	2,52	1,34	5,66	1,4	13985,16	70,69	19,81	6992,58	49,99
839	56,9	0,62	55,1	24,3	3,24	0,67	7,32	1,4	13985,16	70,69	19,81	6992,58	49,99

Célula C5 del string sombreada parcialmente

FS	Irradiancia (W/m ²)	T (teórica) (°C)	Pdisip (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Ta (exp.) (°C)	% error T	Pdisip (exp.) (W)	% error pot	V viento (m/s)	Re	Nusselt	h (W/m ² ·°C)	Re atrás	Nusselt atrás	L _c (m)
0,05	904	69,4	12,78	74,0	27,2	6,16	12,38	3,23	1,4	13447,27	69,32	20,20	6723,63	40,01	0,15
0,15	940	78,3	13,80	73,8	29,1	6,14	13,88	0,55	1,8	14984,10	73,17	24,56	7492,05	51,74	0,13
0,25	956	83,6	13,55	79,4	31,3	5,36	13,48	0,52	1,7	11974,47	65,41	25,94	5987,24	46,25	0,11
0,45	947	77,0	11,62	76,0	31,8	1,30	11,75	1,13	2,1	10757,81	62,00	33,78	5378,91	43,84	0,08
0,66	911	72,5	7,81	72,8	33,0	0,43	7,89	1,02	1,9	6083,29	46,62	40,62	3041,64	32,97	0,05
0,84	854	62,3	3,94	65,7	34,0	5,23	3,93	0,11	1,7	2177,18	27,89	60,74	1088,59	19,72	0,02

Célula C4 del string sin sombreadar

Irradiancia (W/m ²)	T (teórica) (°C)	Pcedida (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Ta (exp.) (°C)	% error T	Pcedida (exp.) (W)	% error pot	V viento (m/s)	Re	Nusselt	h (W/m ² ·°C)	Re atrás	Nusselt atrás
904	58,3	2,59	59,0	27,2	1,14	2,56	1,35	1,4	13985,16	70,69	19,81	6992,58	49,99
940	57,8	2,62	57,0	29,1	1,44	2,65	1,23	1,8	17980,92	80,16	22,44	8990,46	56,68
956	61,7	2,48	62,0	31,3	0,50	2,50	0,83	1,7	16981,98	77,90	21,81	8490,99	55,08
947	59,8	1,95	59,7	31,8	0,12	1,97	1,14	2,1	20977,74	86,58	24,22	10488,87	61,22
911	62,5	1,21	60,7	33,0	2,90	1,24	2,24	1,9	18979,86	82,35	23,05	9489,93	58,23
854	64,3	0,56	62,0	34,0	3,65	0,58	2,80	1,7	16981,98	77,90	21,81	8490,99	55,08

Célula E6 del string sombreada parcialmente

FS	Irradiancia (W/m ²)	T (teórica) (°C)	Pdisip (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Ta (exp.) (°C)	% error T	Pdisip (exp.) (W)	% error pot	V viento (m/s)	Re	Nusselt	h (W/m ² ·°C)	Re atrás	Nusselt atrás	L _c (m)
0,12	988	64,2	14,81	63,5	24,9	1,19	14,86	0,36	3,1	27791,02	99,65	31,03	13895,51	70,46	0,14
0,20	926	73,4	13,08	74,7	36,3	1,69	13,45	2,82	3,3	25357,71	95,19	34,57	12678,85	67,31	0,12
0,33	850	55,3	12,86	57,9	25,7	4,41	13,05	1,40	5,0	32017,31	106,96	46,59	16008,65	75,63	0,10
0,53	753	53,7	9,33	57,7	26,2	6,98	9,58	2,61	3,9	17481,45	79,03	49,18	8740,72	55,89	0,07
0,72	630	45,5	5,23	48,8	26,7	6,82	5,40	2,99	4,0	10245,54	60,51	65,88	5122,77	42,78	0,04

Célula E5 del string sin sombrear

Irradiancia (W/m ²)	T (teórica) (°C)	Pcedida (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Ta (exp.) (°C)	% error T	Pcedida (exp.) (W)	% error pot	V viento (m/s)	Re	Nusselt	h (W/m ² ·°C)	Re atrás	Nusselt atrás
988	47,6	2,99	48,1	24,9	1,03	2,94	1,54	3,1	30967,14	105,19	29,40	15483,57	74,38
926	57,3	2,51	59,8	36,3	4,14	2,57	2,47	3,3	32965,02	108,53	30,33	16482,51	76,74
850	41,5	2,17	42,9	25,7	3,19	2,22	2,22	5,0	49947,00	133,59	37,31	24973,50	94,46
753	42,6	1,47	40,7	26,2	4,78	1,52	3,35	3,9	38958,66	117,99	32,96	19479,33	83,43
630	41,6	0,79	41,0	26,7	1,44	0,82	3,96	4,0	39957,60	119,49	33,38	19978,80	84,49

16 células por diodo

Célula C3 del string sombreada parcialmente

FS	Irradiancia (W/m ²)	T (teórica) (°C)	Pdisip (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Ta (exp.) (°C)	% error T	Pdisip (exp.) (W)	% error pot	V viento (m/s)	Re	Nusselt	h (W/m ² ·°C)	Re atrás	Nusselt atrás	L _c (m)
0,13	845	91,3	31,21	83,1	30,5	9,91	31,54	1,07	2,5	20811,25	86,23	28,92	10405,62	60,98	0,13
0,14	684	90,7	29,45	84,2	21,8	7,69	29,70	0,85	1,4	11654,30	64,53	21,68	5827,15	45,63	0,13
0,24	786	96,7	31,33	88,2	22,4	9,62	31,20	0,40	1,8	13831,48	70,30	25,56	6915,74	49,71	0,12
0,45	875	101,4	26,51	94,7	24,7	7,04	26,69	0,64	1,8	9220,98	57,40	31,28	4610,49	40,59	0,08
0,66	929	92,8	18,82	91,2	26,5	1,81	19,22	2,07	2,0	6403,46	47,83	41,68	3201,73	33,82	0,05
0,84	961	76,3	10,28	76,5	28,6	0,32	10,41	1,29	2,1	2689,45	31,00	67,51	1344,73	21,92	0,02

Célula C4 del string sin sombrear

Irradiancia (W/m ²)	T (teórica) (°C)	Pcedida (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Ta (exp.) (°C)	% error T	Pcedida (exp.) (W)	% error pot	V viento (m/s)	Re	Nusselt	h (W/m ² ·°C)	Re atrás	Nusselt atrás
845	52,4	2,39	53,0	30,5	1,18	2,39	0,22	2,5	24973,50	94,46	26,41	12486,75	66,80
684	45,2	2,05	46,0	21,8	1,80	2,12	3,14	1,4	13985,16	70,69	19,81	6992,58	49,99
786	46,4	2,18	49,0	22,4	5,25	2,26	3,24	1,8	17980,92	80,16	22,44	8990,46	56,68
875	52,5	1,87	55,0	24,7	4,59	1,91	1,90	1,8	17980,92	80,16	22,44	8990,46	56,68
929	55,7	1,29	58,5	26,5	4,79	1,32	2,50	2,0	19978,80	84,49	23,64	9989,40	59,74
961	59,2	0,69	60,7	28,6	2,52	0,71	3,07	2,1	20977,74	86,58	24,22	10488,87	61,22

Célula C5 del string sombreada parcialmente

FS	Irradiancia (W/m ²)	T (teórica) (°C)	Pdisip (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Ta (exp.) (°C)	% error T	Pdisip (exp.) (W)	% error pot	V viento (m/s)	Re	Nusselt	h (W/m ² ·°C)	Re atrás	Nusselt atrás	L _c (m)
0,13	680	79,9	25,06	76,3	33,3	4,73	24,89	0,65	2,8	23308,60	91,26	30,60	11654,30	64,53	0,13
0,20	747	87,1	28,76	81,5	33,0	6,87	28,74	0,05	3,0	23052,46	90,76	32,96	11526,23	64,18	0,12
0,28	833	103,1	29,91	95,0	32,3	8,56	30,17	0,87	2,1	14792,00	72,70	28,82	7396,00	51,41	0,11
0,47	906	102,9	26,98	96,0	31,1	7,24	26,91	0,28	2,3	11782,37	64,89	35,34	5891,18	45,88	0,08
0,66	947	101,5	19,89	95,3	30,5	6,56	20,02	0,63	1,9	6083,29	46,62	40,63	3041,64	32,97	0,05
0,84	970	77,1	11,58	76,5	29,2	0,83	11,79	1,75	2,5	3201,73	33,82	73,65	1600,87	23,92	0,02

Célula C4 del string sin sombreadar

Irradiancia (W/m ²)	T (teórica) (°C)	Pcedida (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Ta (exp.) (°C)	% error T	Pcedida (exp.) (W)	% error pot	V viento (m/s)	Re	Nusselt	h (W/m ² ·°C)	Re atrás	Nusselt atrás
680	49,8	1,99	52,5	33,3	5,06	1,86	6,96	2,8	27970,32	99,97	27,95	13985,16	70,69
747	50,7	2,07	53,0	33,0	4,30	2,10	1,30	3,0	29968,20	103,48	28,92	14984,10	73,17
833	56,2	2,13	59,7	32,3	5,88	2,17	1,58	2,1	20977,74	86,58	24,22	10488,87	61,22
906	56,8	1,81	60,0	31,1	5,39	1,90	4,61	2,3	22975,62	90,61	25,34	11487,81	64,07
947	61,0	1,32	62,5	30,5	2,37	1,39	5,15	1,9	18979,86	82,35	23,05	9489,93	58,23
970	57,4	0,76	59,2	29,2	3,05	0,80	4,76	2,5	24973,50	94,46	26,41	12486,75	66,80

Célula E6 del string sombreada parcialmente

FS	Irradiancia (W/m ²)	T (teórica) (°C)	Pdisip (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Ta (exp.) (°C)	% error T	Pdisip (exp.) (W)	% error pot	V viento (m/s)	Re	Nusselt	h (W/m ² ·°C)	Re atrás	Nusselt atrás	L _c (m)
0,10	1012	86,7	37,25	86,5	24,1	0,26	37,48	0,60	3,0	26894,54	98,03	30,53	13447,27	69,32	0,14
0,18	1016	89,4	39,33	85,2	23,6	4,88	39,44	0,29	3,7	30800,65	104,91	35,17	15400,32	74,18	0,13
0,28	997	89,8	38,04	84,0	21,8	6,95	38,03	0,03	3,8	26766,47	97,80	38,74	13383,23	69,15	0,11
0,48	951	82,3	30,65	77,2	21,0	6,65	30,80	0,48	4,2	21515,63	87,68	47,74	10757,82	62,00	0,08
0,67	880	79,9	20,46	76,9	20,3	3,96	20,99	2,53	2,9	9285,02	57,60	50,18	4642,51	40,72	0,05
0,85	776	62,0	10,55	57,9	20,1	7,01	10,72	1,59	2,8	3585,94	35,80	77,95	1792,97	25,31	0,02

Célula D6 del string sin sombrear

Irradiancia (W/m ²)	T (teórica) (°C)	Pcedida (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Ta (exp.) (°C)	% error T	Pcedida (exp.) (W)	% error pot	V viento (m/s)	Re	Nusselt	h (W/m ² ·°C)	Re atrás	Nusselt atrás
1012	47,9	2,97	50,9	24,1	5,95	3,00	1,02	3,0	29968,20	103,48	28,92	14984,10	73,17
1016	45,0	3,02	47,5	23,6	5,17	3,06	1,19	3,7	36960,78	114,92	32,11	18480,39	81,26
997	42,8	2,80	46,0	21,8	7,01	2,87	2,28	3,8	37959,72	116,46	32,54	18979,86	82,35
951	40,7	2,13	41,7	21,0	2,43	2,20	3,50	4,2	41955,48	122,44	34,21	20977,74	86,58
880	43,0	1,38	44,8	20,3	3,90	1,47	6,02	2,9	28969,26	101,74	28,44	14484,63	71,94
776	41,3	0,72	42,4	20,1	2,70	0,73	1,80	2,8	27970,32	99,97	27,95	13985,16	70,69

24 células por diodo

Célula C3 del string sombreada parcialmente

FS	Irradiancia (W/m ²)	T (teórica) (°C)	Pdisip (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Ta (exp.) (°C)	% error T	Pdisip (exp.) (W)	% error pot	V viento (m/s)	Re	Nusselt	h (W/m ² ·°C)	Re atrás	Nusselt atrás	L _c (m)
0,10	939	116,9	53,00	116,0	32,1	0,82	53,00	0,00	2,3	20619,15	85,84	26,74	10309,57	60,69	0,14
0,17	975	137,6	55,28	125,8	30,5	9,39	55,96	1,22	1,9	15816,55	75,18	25,23	7908,27	53,16	0,13
0,27	980	137,9	55,19	125,6	30,0	9,79	55,42	0,42	2,4	16905,14	77,72	30,80	8452,57	54,96	0,11
0,47	961	134,7	45,47	124,7	29,0	8,06	45,76	0,64	2,4	12294,65	66,28	36,10	6147,32	46,87	0,08
0,69	917	121,1	31,73	114,5	27,1	5,73	31,91	0,58	2,1	5378,91	43,84	47,74	2689,45	31,00	0,04
0,9	845	95,2	16,85	87,5	25,0	8,77	17,12	1,58	2,2	1408,76	22,44	97,71	704,38	15,86	0,01

Célula D3 del string sin sombrear

Irradiancia (W/m ²)	T (teórica) (°C)	Pcedida (teórica) (W)	T (exp.) (°C)	Ta (exp.) (°C)	% error T	Pcedida (exp.) (W)	% error pot	V viento (m/s)	Re	Nusselt	h (W/m ² ·°C)	Re atrás	Nusselt atrás
939	58,3	2,10	60,6	32,1	3,74	2,16	2,81	2,3	22975,62	90,61	25,34	11487,81	64,07
975	59,9	2,50	64,2	30,5	6,73	2,55	1,66	1,9	18979,86	82,35	23,05	9489,93	58,23
980	56,3	2,49	60,5	30,0	6,88	2,53	1,63	2,4	23974,56	92,56	25,88	11987,28	65,45
961	55,5	2,03	59,1	29,0	6,12	2,07	1,88	2,4	23974,56	92,56	25,88	11987,28	65,45
917	55,0	1,40	56,1	27,1	1,94	1,44	2,43	2,1	20977,74	86,58	24,22	10488,87	61,22
845	51,0	0,75	54,2	25,0	5,86	0,76	1,40	2,2	21976,68	88,62	24,79	10988,34	62,66

